

PROYECTO FIN DE CARRERA



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

**DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS
CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS**

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UNA TORRE DE CELOSÍA DE 40 METROS PORTADORA DE ANTENAS.

Autor: Alfonso Carrasco Martínez

Director: José Fernández Sáez

Leganés, junio de 2009

Agradecimientos:

Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de mi tutor, D. José Fernández Sáez, que me confió este proyecto, por la disposición y atención inmejorables que ha tenido en todo momento y por compartir conmigo sus conocimientos en la materia.

A todo el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras por el trato recibido.

A la Universidad Carlos III de Madrid y en particular a la Escuela Politécnica Superior y a todos sus departamentos por haber participado de mi formación en estos años de carrera.

Parte fundamental han sido D. Edelmiro Sixto Pardo (SEMI, División de Comunicaciones) y D. Alfredo López Calderón (creador y desarrollador del programa ALCE). Ellos fueron quienes me enseñaron a manejar el programa y a entender el mundo de las torres de comunicaciones.

Gracias también a D. Roberto Flores y a D. Ángel Acitores por transmitirme sus conocimientos sobre telecomunicaciones.

No puedo olvidar a D. Leandro Rico Abad y D. Guillermo Ausín San Nicolás, Delegado de Talleres y Director del departamento de Suministros, respectivamente, por darme la oportunidad de entrar a formar parte de SEMI, y de esta forma entrar en contacto con el tema de las torres de comunicaciones.

Por supuesto, gracias a todos mis compañeros en la empresa por saber soportar los malos momentos y haber colaborado también con sus ánimos. Sobre todo, D. Ángel Pérez, jefe de administración de la delegación de talleres.

Por último, no puedo dejar de mencionar a mi familia, por su apoyo incondicional y su ayuda en los momentos difíciles, especialmente a mis padres, por su capacidad de motivación. A mi hermana Carmela, sin quien no hubiese sido posible siquiera empezar este proyecto. A mi hermana María, por entenderme, por su complicidad, por sus consejos.

A Elena, por estar a mi lado en todo momento y por ser ella quien me empujó a buscar trabajo, recalando en SEMI.

A mis amigos, Nacho, Diego, Raúl, Iván, Andrés, Analía, Gema y tantos otros con los que he compartido horas de estudio y que han hecho más llevaderos todos estos años.

Gracias por creer.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	6
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	7
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 CONTENIDO.....	9
Capítulo 2 ESPECIFICACIÓN PARA TORRES DE TELEFONÍA	10
2.1 MÁSTIL.....	11
2.1.1 PLATAFORMA DE TRABAJO Y DESCANSO.....	12
2.1.2 SISTEMA DE ACCESO Y DISPOSITIVO ANTICAÍDA.....	13
2.1.3 SOPORTE GUIAONDAS O COAXIALES	13
2.2 SOPORTES DE ANTENAS PARA INSTALACIÓN SOBRE MÁSTIL.....	14
2.2.1 TRIÁNGULO	14
2.2.2 SECTOR	15
2.2.3 MÉNSULA RETRÁCTIL PARA ANTENA TIPO OMNI.....	16
2.2.4 MÉNSULA RETRÁCTIL PARA ANTENA TIPO PANEL	17
2.2.5 MÉNSULA FIJA PARA ANTENA TIPO PANEL	17
2.3 NORMATIVA APLICADA.....	18
CAPÍTULO 3 PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS	19
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	20
3.2 MATERIALES	20
3.2.1 ACEROS ESTRUCTURALES.....	20
3.2.2 TORNILLERÍA	21
3.2.3 CIMENTACIÓN.....	21
3.2.4 RECUBRIMIENTOS	22
3.3 FABRICACIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS	23
3.3.1 UNIONES ATORNILLADAS.....	23
3.3.2 UNIONES SOLDADAS Y PLEGADAS	25
CAPÍTULO 4 MODIFICACIONES PROPUESTAS	27
4.1 INTRODUCCIÓN.....	28
4.2 ALTERNATIVA PROPUESTA. EL MÁSTIL ACME.....	29
CAPÍTULO 5 CALCULOS JUSTIFICATIVOS	34
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	35
5.2 HIPÓTESIS DE CÁLCULO	35
5.2.1 ACCIONES ADOPTADAS PARA EL CÁLCULO	35

5.2.2	REQUISITOS DE CÁLCULO	37
5.3	ESTIMACIÓN DE CARGAS SOBRE EL MÁSTIL	38
5.3.1	CARGAS GRAVITATORIAS	38
5.3.2	DETERMINACIÓN DE LA CARGA DEL VIENTO	40
5.4	MODELO COMPUTACIONAL EMPLEADO: DIMENSIONAMIENTO Y RESULTADOS. ...	47
5.4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ALCE	47
5.4.2	MODELO GENERADO:	50
5.4.3	DIMENSIONAMIENTO Y RESULTADOS:	55
5.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO ESTRUCTURAL	61
5.6	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN.....	63
5.6.1	MÉTODO SUIZO:	63
5.6.2	FORMA DE PROCEDER:	65
5.6.3	CÁLCULOS:	66
5.7	PRESUPUESTO	68
	CAPÍTULO 6 RESUMEN Y CONCLUSIONES	70
6.1	RESUMEN Y CONCLUSIONES	71
	CAPÍTULO 7 ANEXOS.....	74
7.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS	75
7.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS TRANSFER.	77
7.3	PLANOS ACLARATORIOS.....	78
7.4	MÉTODO MATRICIAL. DESARROLLO TEÓRICO.....	87
7.5	MODELO COMPUTACIONAL POR TRAMOS.....	96
7.6	HOJAS DE RESULTADOS ALCE.....	117
7.6.1	DATOS DE SALIDA.....	117
7.6.2	DIAGRAMAS DE ESFUERZOS.....	127
	CAPÍTULO 8 REFERENCIAS.....	129
8.1	REFERENCIAS:	130

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general

En este proyecto fin de carrera se presenta un modelo habitual de torre de celosía portadora de antenas a partir del cual se propone un diseño para la optimización del mismo.

Esta optimización consiste en la reducción de peso de la estructura, siendo éste el factor clave para reducir el coste de este tipo de mástiles.

Aunque no será sólo este aspecto el que se revise, pues como se verá a lo largo del documento son varios los elementos de diseño que se han retocado a fin de conseguir un ahorro en otros campos, como el aprovechamiento máximo de materiales o los procesos de fabricación.

La particularidad de la estructura del texto se debe a que se ha intentado ser fiel al patrón empleado en los proyectos de este tipo de estructuras.

En esta introducción se establece la estructura del documento y se explican brevemente las motivaciones y objetivos por los que se acomete esta tarea de optimización.

A continuación se introduce el tipo de torre M4A – CEL/CUA – EX, modelo clásico de Telefónica Móviles España y que es el objeto de comparación.

Se especifican así todas las características que debe cumplir un mástil para poder ser homologado y utilizado en la red de Telefónica España.

En la parte central y base del proyecto se presentan las modificaciones propuestas para la optimización del diseño y se demuestra, mediante los cálculos necesarios, que dicha optimización responde a las solicitudes requeridas.

Por último, se incluye un presupuesto de fabricación y los anexos que completan las explicaciones necesarias sobre las medidas adoptadas en el diseño.

Para poder establecer las bases de este estudio es recomendable realizar un breve repaso sobre el tipo de estructuras existentes para este tipo de funcionalidad.

Las variedades constructivas existentes son muy dispares, pero se pueden englobar en tres grandes grupos.

Por un lado están las torres tubulares o monoposte, basadas en la utilización de perfiles tubulares de distintos diámetros.

Existen los mástiles autosoportados, que son torres de celosía, generalmente de sección cuadrada o rectangular.

La tercera vía es la de las torres venteadas, que consisten en mástiles más esbeltos, de gran altura, que se ayudan de riostras de tipo cable a distintas alturas, para vencer las solicitudes a las que se exponen.

Dentro de los mástiles tubulares los hay de sección circular, como se decía antes a base de perfiles normalizados tubulares, y las torres dodecagonales, construidas con chapas plegadas y soldadas.

Este grupo tiene el inconveniente de un elevado precio de la materia prima, pero las ventajas de fácil montaje, que se limita a la unión atornillada de los distintos tramos, y el

anclaje independiente del resto de la torre, lo que facilita la planificación de la obra civil, fabricación e instalación.

Por otro lado, la colocación de las antenas puede hacerse en cualquier dirección, lo que significa otra importante ventaja.

El auge de este tipo de estructuras se debe al menor impacto visual y medioambiental al que someten al entorno en el que se emplazan.

Las torres autosoportadas, que son las más habituales, tienen la ventaja del precio del material.

Fabricadas a base de perfiles normalizados laminados en caliente, en líneas generales fáciles de encontrar en el mercado, su coste no es excesivo.

Pero la mano de obra y el montaje son mayores, pues la necesidad de fabricar cada barra e, identificar y clasificar todas ellas lleva tiempo que repercute en el precio final.

Además todas las barras se unen mediante tornillos, y rara vez con soldadura, lo que dificulta el montaje. Lo que implica también mayores cargas.

Las antenas necesitan en muchos casos de herrajes especiales para su orientación adecuada.

Los mástiles venteados pueden ser tanto tubulares como de celosía.

En ambos casos, la gran ventaja es la posibilidad de alcanzar grandes alturas.

Pero las desventajas son las mismas que en las otras dos opciones, con el inconveniente añadido de la necesidad de utilizar mayor extensión de terreno para su instalación, por el emplazamiento de los vientos.

Es una solución constructiva que se adopta cuando las circunstancias requieren cotas muy elevadas para la posición de las antenas y no se puede plantear otro tipo de mástil.

Se ha elegido partir de una torre de celosía para este estudio por ser las más habituales, y de condiciones y circunstancias más parecidas.

Son, también, las que hoy en día más posibilidades de optimización pueden presentar.

1.2 Objetivos.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este estudio es la optimización del diseño de una torre portadora de antenas.

La base de partida es la torre tipo de telefónica denominada M4A – CEL/CUA – EX.

La torre propuesta reúne una serie de características constructivas particulares que han hecho posible alcanzar de manera satisfactoria dicho objetivo.

No hay que perder de vista el enfoque académico que tiene este proyecto y por tanto, no se encuentra aquí un diseño exhaustivo de la solución.

Se ha realizado el diseño conceptual del mástil, los cálculos estructurales y de cimentación, pero no los detalles constructivos del mismo.

Se pretende abrir un camino para la investigación y desarrollo de este tipo de estructuras, que podría ser interesante para reactivar el mercado de las mismas, pues desde el momento del boom de las telecomunicaciones en España a mediados de los años 90, dicho mercado se encuentra en estado estacionario ya que se han cubierto prácticamente en su totalidad las necesidades creadas por este producto.

También es necesario tener en cuenta que este diseño responde a las especificaciones establecidas por las normas de aplicación en España siendo, por tanto, interesante fomentar el estudio y afino del mismo para que cumpla con las normas vigentes en la legislación de otros países de forma que se convierta en un producto interesante para su fabricación y exportación.

Queda por otro lado pendiente también el desarrollo de toda la familia de torres en todo el rango de alturas comerciales.

1.3 Contenido.

Como se comentaba con anterioridad, la estructura del texto responde a la unificación de los formatos correspondientes a un proyecto fin de carrera y al patrón habitual utilizado en la definición de este tipo de estructuras. De esta manera, el documento se divide en una serie de capítulos, apartados y anexos que se explican a continuación.

- Capítulo 1. Breve introducción, objetivos del proyecto y estructura del texto.
- Capítulo 2. Presentación de la estructura base de optimización. Características y especificaciones.
- Capítulo 3. Pliego de condiciones técnicas que deben cumplir las torres portadoras de antenas.
- Capítulo 4. Explicación de las modificaciones propuestas para lograr dicha optimización.
- Capítulo 5. Exposición de los cálculos justificativos que certifican la validez del diseño, indicando el modelo computacional desarrollado. Análisis de resultados del cálculo estructural. Se establece aquí una comparación somera entra ambas estructuras. Se incluye presupuesto de fabricación.
- Capítulo 6. Conclusiones y comentarios.
- Capítulo 7. Anexos. Datos de interés para el seguimiento del proyecto.

Capítulo 2 ESPECIFICACIÓN PARA TORRES DE TELEFONÍA

2.1 Mástil.

Los mástiles de celosía de Telefónica Móviles son estructuras autosoportadas verticales de forma prismática y de sección cuadrangular, autoestables y de esbeltez considerable, que están constituidas por perfiles angulares enlazados formando redes triangulares por montantes y diagonales.

La altura del mástil es el valor nominal en metros desde la base hasta el último nivel de colocación de antenas, no contándose como altura del mismo los herrajes para colocación de pararrayos o tubos soportes que superen la altura de la estructura.

El mástil está constituido por tramos de 5 metros, pudiéndose formar las siguientes alturas normalizadas:

- Mástil de 15 metros: Tramos 0-1-7-8.
- Mástil de 20 metros: Tramos 0-1-2-7-8.
- Mástil de 25 metros: Tramos 0-1-2-3-7-8.
- Mástil de 30 metros: Tramos 0-1-2-3-4-7-8.
- Mástil de 35 metros: Tramos 0-1-2-3-4-5-7-8.
- Mástil de 40 metros: Tramos 0-1-2-3-4-5-6-7-8.

El tramo inferior (tramo 0) estará embutido en la cimentación y servirá de arranque para la formación del fuste. La zapata o cimentación se ejecutará para soportar la altura máxima normalizada de cuarenta metros, independientemente de la altura solicitada en cada emplazamiento.

La zapata tendrá una profundidad mínima de 3,30 metros. En ningún caso se admitirá una zapata de menor profundidad y, cuando por el estudio geológico se recomiende una profundidad mayor, el suministrador lo cuantificará mediante los cálculos y ensayos pertinentes. La sección será cuadrada cuya anchura será variable dependiendo del coeficiente de compresibilidad encontrado en el terreno. Estos valores están indicados en los planos y cálculos, siendo la anchura mínima de 2,10 metros para terrenos muy duros y de 3,45 metros para terrenos blandos. Para evitar retenciones de agua, la zapata sobresaldrá 0,15 m del nivel de terreno y tendrá una pequeña pendiente (5% a cuatro aguas) del centro hacia los lados. Para evitar retracciones en el hormigón todas las cimentaciones llevarán un mallazo electrosoldado en la base y laterales.

Todos los mástiles, independientemente de su altura, constan de dos secciones cuadradas diferentes; una de 1,4 metros de lado y altura variable que forma, prácticamente, la parte resistente de la estructura y otra de 1,2 m de lado y 7,5 metros de altura que se sitúa en la parte superior (tramo 8) destinada a la ubicación de los diferentes soportes de antenas. Ambas secciones se unirán mediante una transición troncocónica de reducción, de 2,5 metros de altura, que permite ensamblar ambas secciones (tramo 7).

La estructura (fuste, elementos de unión, etc.) se diseñará para soportar una velocidad mínima de viento de 165 km/h y una capacidad de cargas de antenas, modelo **M4**, con la siguiente configuración de antenas:

- 4 antenas colineales y 3 parábolas de ϕ 0,6 m ($Seq= 2,58 \text{ m}^2$) en cota nominal.
- 1 triángulo de 4,5 m de lado para soportar 6 antenas de panel de 2,5x0,3 m y 6 antenas de panel de 1,5x0,2 m ($Seq=7,31 \text{ m}^2$), situado a 1 metro de cota nominal.
- 1 triángulo de 2,5 m de lado para soportar 6 antenas de panel de 2x0,175 m y 6 antenas de panel de 1,5x0,2 ($Seq=4,24 \text{ m}^2$), situado a 4 metros de cota nominal.

La designación de esta estructura, según tipología y carga será:

M4A-CEL/CUA-EX(SS)-P

Donde:

- M4: Define la capacidad máxima de cargas de antenas.
A: La sustentación del mástil es Autosoportado.
CEL: Mástil de celosía.
CUA: Sección del mástil cuadrada.
EX: Exposición topográfica al viento expuesta (165 Km/h).
SS: Indica la altura del mástil.
P: Identificación en los casos que sea necesario instalar un pararrayos tipo Franklin.

Todos los mástiles irán dotados de los siguientes elementos y accesorios: Plataformas de trabajo y descanso; escalera de accesos y sistema anticaída; soportes guías y red de tierras.

2.1.1 Plataforma de trabajo y descanso

Las plataformas de trabajo constituyen la zona de trabajo o descanso en la estructura del fuste.

Se dispondrá de plataformas de descanso como máximo cada 9 metros. Su construcción se efectúa mediante tramex para evitar el deslizamiento del calzado, al mismo tiempo que permite el paso de agua y nieve evitando retenciones y acumulaciones sobre la misma. Posee una abertura en la zona de escalera, para el paso de hombre y no se la dota de compuerta para facilitar el acceso entre los diferentes tramos. La superficie se

diseña con suficiente dimensión para permitir la estancia de una persona cómodamente, además y a 1,2 metros de altura, se le dota de una barandilla.

Con objeto de facilitar la instalación de radioenlaces, si fuesen necesarios, en los tramos 1 a 6, los perfiles horizontales se dejarán pretaladrados para recibir la plataforma de trabajo correspondiente.

En la zona de instalación de antenas, tramo 8, se dotarán de plataformas de trabajo de forma que, además, sirven de descanso para respetar los nueve metros indicados. Su construcción es similar a la de descanso, con la salvedad de que se le dota de una trampilla abatible en zona de paso de hombre, en la que una vez accedido a la misma, se dispone de un mayor espacio para efectuar los trabajos. Ambas plataformas se diseñan para soportar una carga de 250 kg/m^2 (2.452 N/m^2).

2.1.2 Sistema de acceso y dispositivo anticaída

El sistema de acceso es el medio que permite la inspección y el control de las antenas y de el propio mástil.

El sistema de acceso será mediante escalera que discurre por el interior del fuste dispuesta por la misma vertical en toda su longitud.

La escalera está formada por angulares verticales de L50x50x5, unidos por peldaños formados por redondos macizos de $\phi 20 \text{ mm}$, soldados a los angulares verticales, y separados 250 mm entre sí. La anchura o separación entre los bordes de los montantes verticales será de 400 mm.

Como medida de seguridad, para evitar la caída de personas durante las operaciones de subida y bajada, se instalará un sistema anticaída homologado por Telefónica Móviles. El suministrador entregará por cada emplazamiento un certificado original de garantía del sistema instalado, que irá incluido en el proyecto específico.

2.1.3 Soporte guíasondas o coaxiales

Los guíasondas o coaxiales son cables, relativamente rígidos y con ciertas limitaciones a las curvaturas (no inferiores a 0,5 m), que unen las antenas con los equipos de radio situados en el interior de los edificios destinados a Estaciones de Base o al propio equipo, si éste es de intemperie. El número de cables por antena es de uno, aunque en determinadas configuraciones pueden ser necesarios dos.

Su trazado discurre por el interior del fuste (guiaondas verticales) y por el espacio comprendido entre el mástil y la EB (guiaondas horizontal).

El trazado vertical se diseña para fijar los cables en un perfil en L45x45x5, de un metro de longitud, dispuesto horizontalmente y paralelo a la escalera de acceso. Estos perfiles se instalan en toda la vertical separados cada 1,5 metros.

El trazado horizontal se diseña para que se puedan fijar los cables guiaondas a un perfil transversal L45x45x5, soportado sobre dos U de 80. En la parte superior y para salvaguardar los guiaondas de cualquier impacto se protege mediante una chapa galvanizada de 2 mm de espesor. El montaje sobre la caseta se efectuará de forma que la pendiente sea hacia el mástil para evitar discurran aguas hacia la caseta en el caso de lluvias. En el caso de instalación de equipo de intemperie el g/o se colocará en la parte inferior del mástil, a unos 40 cm del suelo.

La distancia entre la caseta/equipo de intemperie y el mástil se definirá en cada caso según replanteo, no obstante esta distancia suele estar comprendida entre 1 y 3 metros.

2.2 Soportes de antenas para instalación sobre mástil

Los soportes de antenas son los elementos necesarios para la instalación de los sistemas radiantes sobre el mástil, de la forma más adecuada para que, en cada caso particular se consigan los objetivos de cobertura. Para sujetar las antenas en los soportes se utilizan tubos de amarre que serán de $\phi 60 \times 4$ mm. Los soportes para esta estructura serán los siguientes:

- Triángulo 4,5M y 2,5M
- Sector 4,5M y 2,5 M.
- Ménsula retráctil para antena tipo Omni.
- Ménsula retráctil para antena tipo panel.
- Ménsula fija para antena tipo panel.

La utilización de cada uno de estos soportes se efectuará en función de la configuración del sistema radiante a instalar.

2.2.1 Triángulo

Consiste en una estructura de acero galvanizado de celosía, con forma prismática de base triangular equilátera y con los vértices achaflanados y de altura un (1) metro, cuyas dimensiones son función del sistema a instalar. Para este prisma los lados de cada triángulo corresponden con la cara de cada sector por lo que la distribución relativa entre

caras será: $S1=0^{\circ}$, $S2=120^{\circ}$, $S3=240^{\circ}$, pudiéndose orientar el mismo en cualquier posición requerida.

La colocación de los triángulos sobre el mástil se realiza orientando el lado del Sector 1 en el ángulo solicitado respecto de la dirección N-S (cero grados), teniendo en cuenta que el giro se efectúa en sentido de las agujas del reloj.

Para la instalación y mantenimiento de las antenas los triángulos llevan incorporados una plataforma de trabajo, cuyas características se adjuntan en los planos.

La definición y denominación de los triángulos corresponde con la longitud del lado para la colocación de antenas, por lo tanto los triángulos normalizados serán: **4,5M** (lado triángulo = 4,5 metros) y **2,5M** (lado triángulo = 2,5 metros) .

La altura de instalación del triángulo sobre el fuste es la cota en metros desde la base hasta la mitad de la altura del prisma, este punto del prisma coincide con el centro de la antena.

La distribución y separación de antenas sobre los triángulos dependerá de los sistemas radiantes a instalar en cada momento. La separación en el plano horizontal entre las antenas se efectuará entre centros de las mismas, por lo tanto la instalación de los tubos amarre de antenas serán coincidente con esta cota.

En el caso de instalación de triángulo 4,5M, la distribución de antenas será para el sistema GSM 900: 2 antenas panel por sector separadas 4 metros; sistema DCS 1800: 2 antenas panel por sector separadas 2 metros; separación entre sistemas 1 metro.

La solución constructiva de los triángulos se ha efectuado de forma que el de 4,5M está montado sobre otro inferior de 2,5M, que forma la base y a la vez se une al mástil. Por lo tanto, el triángulo de 4,5M es, prácticamente, una ampliación del de 2,5M.

La fijación al mástil se efectúa por medio de unas piezas especiales adaptadas a los taladros efectuados en los encuentros de los montantes con las diagonales, en todo el tramo de instalación de antenas (tramo 8). Además, dispone de varios taladros que junto con los efectuados a un perfil UPN120 circular permite su orientación cada cinco grados.

2.2.2 Sector

Consiste en una estructura de acero galvanizado de celosía, cuya finalidad es permitir la instalación de antenas correspondientes a un sector.

Su forma es prismática de un metro de altura y su base puede obtenerse, de forma aproximada, como una tercera parte de un triángulo, dividiendo éste en las tres partes que resultan de trazar las tres medianas hasta su intersección.

Al igual que el triángulo, estará dotado de plataformas de trabajo para las tareas de instalación y mantenimiento de antenas.

Asimismo, la definición y denominación de los sectores corresponde con la longitud del lado para la colocación de antenas, por lo tanto actualmente el sector utilizado es el de **4,5M** (lado del sector=4,5 metros) y se prevé el de **2,5 M** (lado del sector =2,5 m).

La colocación de los sectores sobre el mástil se realiza orientando el lado de la base en el ángulo solicitado respecto de la dirección Norte.

La altura de instalación de cada sector sobre el fuste es la cota en metros desde la base hasta la mitad de la altura del prisma, este punto del prisma coincide con el centro de la antena.

Su utilidad es variada ya que permite desde la instalación de antenas para cubrir un solo sector, hasta la instalación de tres sectores con ángulos relativos diferentes a los del triángulo (0°, 120°, 240°).

El número de sectores a instalar en un mismo nivel de antenas está condicionado por las dimensiones físicas de la estructura (sector), ya que en ocasiones pueden solicitarse instalación de sectores cuyos lados pueden cruzarse, en cuyo caso se utilizarán dos niveles instalación. Las configuraciones típicas suelen ser las siguientes:

- 1 Sector. Un nivel de instalación.
- 2 Sectores. Un nivel de instalación.
- 3 Sector. Un nivel de instalación de instalación.
- 1+1 Sector. Dos niveles de instalación.
- 2+1 Sector. Dos niveles de instalación.

El sector se realiza mediante perfilera en L con geometría triangulada. La sujeción al mástil en el tramo 8 de instalación de antenas se efectúa mediante un tubo de $\phi 100$ sujeto mediante dos abrazaderas a dos UPN que sustituyen a los perfiles horizontales del mástil. Con el fin de poder orientar todos los grados requeridos, el sector puede girar sobre el tubo y además dispone de tres posiciones sobre la cara de instalación del mástil.

2.2.3 Ménsula retráctil para antena tipo Omni.

Consiste en una estructura realizada en acero galvanizado, de forma lineal y retráctil que sirve para soportar en su extremo a una antena omnidireccional.

La altura de instalación de las antenas omnis viene definido por la cota en metros desde la base del fuste hasta la parte inferior de la ménsula o base de antena.

Su diseño se efectúa mediante un tubo rectangular de $\square 70 \times 50 \times 4$ mm que se desliza sobre un perfil fijo de tubo cuadrado de $\square 120 \times 120 \times 6$ unido al mástil. La ménsula finaliza en un tubo de amarre de antena de $\phi 60 \times 4$ y una vez extendida, su longitud es de dos (2) metros al centro de fuste y de cuatro metros entre antenas. En este soporte el tubo amarre se considera incluido dentro del propio soporte.

El tubo fijo lleva instalado en su interior dos rodillos de teflón para que la ménsula se extienda y abata con comodidad. Una vez extendida la ménsula, la sujeción se efectúa sobre el tubo fijo por medio de dos abrazaderas roscadas de M12, que una vez apretadas garantizan su verticalidad.

Asimismo, para efectuar las tareas de instalación y de mantenimiento se colocará una plataforma de trabajo.

2.2.4 Ménsula retráctil para antena tipo panel.

Se trata de una estructura de las mismas características que la ménsula para antena omni, con la salvedad de que en este caso, la antena o antenas que se instalan precisan una separación de hasta un máximo de dos metros del centro del fuste debido a los requerimientos de los sistemas radiantes.

La altura de colocación de antenas se efectuará de la misma forma que los indicados en sectores y triángulos.

El soporte está formado por dos ménsulas retráctiles que finalizan en tubo amarre $\phi 60 \times 5$ y de longitud adecuada a la antena a instalar. La sujeción al fuste se efectuará sobre los montantes horizontales y con una separación vertical de un metro. En este soporte el tubo amarre se considera incluido dentro del propio soporte.

Para la instalación y mantenimiento de estas antenas se dotará de la plataforma de trabajo correspondiente.

2.2.5 Ménsula fija para antena tipo panel.

Consiste en una estructura de acero galvanizado que sirve para soportar antenas tipo panel y cuyo sistema radiante no está condicionado por separaciones considerables.

La cota o altura de instalación de esta ménsula es desde la base hasta el centro de la antena, igual que los descritos en el triángulo, sector, etc.

La sujeción al mástil se efectúa mediante dos ménsulas atornilladas al montante del fuste y dispuestas verticalmente con una separación de un metro, en cuyos extremos se sujeta el tubo amarre de antena. La separación entre el montante y el tubo amarre es de 130 mm para facilitar las tareas de instalación de antenas, pudiendo ser esta longitud mayor en función de las dimensiones de la antena. En este soporte el tubo amarre se considera incluido dentro del propio soporte.

Al igual que en el resto de los soportes, se montará una plataforma de trabajo de forma que se acceda con facilidad a la instalación y mantenimiento de las antenas.

2.3 Normativa aplicada

- NBE - EA-95 Estructuras de acero en la edificación.
- EHE: Instrucción de Hormigón Estructural.
- DIN 4131 Cálculo de torres de antena de acero.
- UNE 37507 Recubrimiento galvanizados en caliente de tornillería y otros elementos de fijación
- UNE 37508 Recubrimientos galvanizados en caliente de piezas y artículos diversos.

CAPÍTULO 3 PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

3.1 Descripción general

En este apartado se describen los condicionantes técnicos y calidades que han de cumplir los diferentes materiales que forman parte de la estructura soporte de antenas.

Asimismo, se indican los requisitos que han de cumplir durante el proceso de fabricación y ejecución de las estructuras metálicas, de acuerdo con los requisitos de diseño y cálculo indicados en los apartados correspondientes.

3.2 Materiales

3.2.1 Aceros Estructurales

Los perfiles laminados y chapas estructurales se ajustarán en cuanto a su composición, química, condicionantes de suministro, recepción, dureza y tolerancias a la Norma NBE-EA-95 Parte 2 *Productos de Acero para Estructuras*.

Los materiales empleados en la construcción e instalación de estructuras soporte de antenas presentarán las siguientes características:

El acero estructural utilizado puede ser de dos tipos que corresponden a las siguientes características mecánicas:

S 275 JR (EN 10025)

	ST	SI
-Límite elástico a tracción (F_{TY})	2.600 kg/cm ²	255 MPa
-Límite elástico a compresión (F_{CY})	2.600 kg/cm ²	255 MPa
-Resistencia máxima a tracción (F_{TU})	4.200 a 5.300 kg/cm ²	412 a 520 MPa
-Resistencia máxima compresión (F_{CU})	4.200 a 5.300 kg/cm ²	412 a 520 MPa
-Alargamiento de rotura (longitudinal/transversal)	22/20 %	22/20 %
-Tensión admisible	1.950 kg/cm ²	190 Mpa
-Módulo elástico a tracción (E_T)	2,1x10 ⁶ kg/cm ²	200.000 MPa
-Módulo elástico a compresión (E_C)	2,1x10 ⁶ kg/cm ²	200.000 MPa
-Coeficiente de Poisson (ν)	0,3	0,3
-Densidad (peso específico)	7.850x10 ⁻⁶ kg/cm ³	77.008 kg/m ³
-Coeficiente de dilatación térmica lineal (α)	12x10 ⁻⁶ C ⁻¹	12x10 ⁻⁶ K ⁻¹
-Módulo de elasticidad transversal $G=E/2(1+\nu)$	0,77x10 ⁶ kg/cm ²	76.923 MPa

S 355 JO (EN 10025)

	ST	SI
-Límite elástico a tracción (F_{TY})	3.600 kg/cm ²	350 MPa
-Límite elástico a compresión (F_{CY})	3.600 kg/cm ²	350 MPa
-Resistencia máxima a tracción (F_{TU})	5.200 a 6.300 kg/cm ²	510 a 615 MPa
-Resistencia máxima compresión (F_{CU})	5.200 a 6.300 kg/cm ²	510 a 615 MPa
-Alargamiento de rotura (longitudinal/transversal)	22/20 %	22/20 %
-Tensión admisible	2.600 kg/cm ²	255 Mpa
-Módulo elástico a tracción (E_T)	2,1x10 ⁶ kg/cm ²	200.000 MPa
-Módulo elástico a compresión (E_C)	2,1x10 ⁶ kg/cm ²	200.000 MPa
-Coeficiente de Poisson (ν)	0,3	0,3
-Densidad (peso específico)	7.850x10 ⁻⁶ kg/cm ³	77.008 kg/m ³
-Coeficiente de dilatación térmica lineal (α)	12x10 ⁻⁶ C ⁻¹	12x10 ⁻⁶ K ⁻¹
-Módulo de elasticidad transversal $G=E/2(1+\nu)$	0,77x10 ⁶ kg/cm ²	76.923 MPa

Dichos aceros se emplean conjuntamente en la misma estructura, indicándose en los planos y cálculos las barras o chapas que corresponde a cada uno de ellos.

3.2.2 Tornillería

La tornillería empleada será de acero galvanizado de calidad 8.8 según DIN 267 que estará marcada en la cabeza de la misma. Las dimensiones métricas de los tornillos y tuercas corresponderán con DIN 7990 y DIN 555, respectivamente. Asimismo, todas las uniones llevarán arandelas planas y grower (muelle).

Las propiedades mecánicas para el acero 8.8 indicado, son:

	ST	SI
-Límite elástico	6.400 kg/cm ²	627 MPa
-Resistencia máxima a tracción	8.000 a 8.300 kg/cm ²	784 a 813 MPa
-Alargamiento de rotura (longitudinal/transversal)	12 %	12 %

3.2.3 Cimentación

La composición elegida para la preparación de las mezclas destinadas a la construcción de las cimentaciones de los mástiles se estudiará para que sea capaz de proporcionar hormigones cuyas características mecánicas, geológicas y de durabilidad satisfagan sobradamente los condicionantes indicados en este pliego. Estos estudios se realizarán teniendo en cuenta, en todo lo posible las condiciones de la obra real

Los componentes del hormigón deberán cumplir las prescripciones incluidas en los Artículos 26, 27, 28 y 29 de la EHE. Además, el ion cloruro total aportado por los componentes no excederá el 0,4% del peso del cemento.

Las características mecánicas de los hormigones empleados en la cimentación deben cumplir con las condiciones impuestas en el Artículo 39, teniendo en cuenta la resistencia de proyecto solicitada.

La resistencia de proyecto f_{ck} no será inferior a 200 kg/cm^2 (20 MPa) para el hormigón en masa de la cimentación y para los casos especiales de cimentación con hormigones armados, la resistencia será de 250 kg/cm^2 (25 MPa), según 30.5 de EHE.

La resistencia a compresión, se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se obtiene a partir de los resultados de ensayo a rotura a compresión, en número igual o superior a dos, realizados sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de 28 días de edad, fabricadas a partir de la amasada, conservadas con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 833301:91, refrendadas según UNE 833303:84 y rotas por compresión, según el método de ensayo indicado en la UNE 83304:84.

En cuanto a las condiciones de calidad, coeficientes de conversión y docilidad del hormigón cumplirá con los apartados específicos del Artículo 30 de EHE.

Las armaduras pasivas para el hormigón serán de acero y estarán constituidas por un mallazo electrosoldado cuya misión serán la de el reparto y control de la fisuración, y por tanto no se tienen en cuenta a los efectos de comprobación de Estados Límites Último.

3.2.4 Recubrimientos

Los recubrimientos que se efectuarán a toda la estructura metálica serán:

Galvanizado en caliente

Todos los elementos que configuran el mástil estarán galvanizados en caliente según norma EN/ISO 1462. La galvanización en caliente es el procedimiento de un recubrimiento de zinc y/o de aleaciones de zinc-hierro sobre los productos de hierro y acero, mediante inmersión de los mismos en zinc fundido.

El espesor del recubrimiento galvanizado para el acero estructural será:

- Para perfiles con espesor Acero $\geq 6 \text{ mm}$: recubrimiento medio $85 \mu\text{m}$ (equivalente a 600 gr/m^2) y espesor local de $70 \mu\text{m}$.
- Para perfiles con espesor Acero $\geq 3 \text{ mm}$ hasta $< 6\text{mm}$: recubrimiento medio $70 \mu\text{m}$ y espesor local de $55 \mu\text{m}$.

El espesor del recubrimiento sobre los elementos roscados centrifugados será:

- Para roscas con diámetro $d \geq 20 \text{ mm}$: recubrimiento medio $55 \mu\text{m}$ y espesor local de $45 \mu\text{m}$.
- Para roscas con diámetro $d \geq 6 \text{ mm}$ hasta $< 20 \text{ mm}$: recubrimiento medio $45 \mu\text{m}$ y espesor local de $35 \mu\text{m}$.

- Para roscas con diámetro $d < 6$ mm: recubrimiento medio $25\ \mu\text{m}$ y espesor local de $20\ \mu\text{m}$.

El procedimiento para la toma de muestras y de ensayos, así como el número de áreas a considerar en los aceros, para comprobar las exigencias especificadas serán las indicadas en la referida norma EN/ISO 1461.

El aspecto del recubrimiento debe estar exento de ampollas, excesiva rugosidad, zonas desnudas y gotas punzantes. Tampoco debe contener residuos del flux de galvanización.

La galvanización debe efectuarse con una calidad de zinc que el permita mantener por debajo del 1,5 % el nivel de impurezas, distintas del hierro y estaño, en el baño.

No se admitirán piezas que no estén cubiertas por el recubrimiento galvanizado que se produzcan por contaminación de la superficie del acero con sustancias que no se eliminan durante los tratamientos previos de desengrase y decapado, o por cualquier otra circunstancia que no esté debidamente documentada y justificada.

Antes de efectuarse la galvanización el suministrador comprobará que la calidad, tamaño, orificios de ventilación y drenaje, acabado superficial, etc., son los correctos para que los espesores del recubrimiento de galvanizado sean los requeridos.

En el caso de pequeñas piezas, como los tornillos, tuercas, arandelas, etc., la galvanización deberá centrifugarse debido a su pequeño tamaño.

Bajo ningún concepto se efectuarán soldaduras después del proceso de galvanizado.

3.3 Fabricación y montaje de las estructuras

Para conseguir el nivel previsto de seguridad estructural especificadas en los diferentes apartados e hipótesis de cálculo el suministrador cumplirá con todos los apartados y condicionantes que se indican a continuación para la fabricación, montaje y ejecución en obra de las estructura.

3.3.1 Uniones atornilladas

Los agujeros para tornillos se efectuarán preferentemente con taladro, pueden no obstante, realizarse con punzón, que estará siempre en perfecto estado, teniendo en cuenta que se garantice que la calidad obtenida no modifique o altere las características mecánicas del acero.

Los agujeros rasgados se punzarán de una sola vez o bien se formarán punzando o taladrando dos agujeros redondos completados mediante cortadura por llama de alta calidad y mecanizando posterior para asegurar que el tornillo pueda moverse libremente a lo largo del óvalo.

La holgura nominal de los agujeros normalizados será la siguiente:

1-1,5 mm para tornillos M12 y M14

1,5-2 mm para tornillos M16 y M24.

Los tornillos serán con la espiga sin rosca en toda la longitud de unión, de forma que después de considerar todos los elementos y tolerancias, ni las roscas ni la terminación de la rosca estén en el plano de cortante.

La longitud del tornillo en la unión a cortante será tal que, después del tesado y tras considerar las tolerancias, la espiga con rosca sobresaldrá mas allá de la tuerca, al menos dos vueltas libres, y de una vuelta entre la tuerca y la parte de la espiga, además de la terminación de la rosca.

Se utilizarán arandelas planas tanto en la cabeza del tornillo como en la tuerca para asegurar tanto el asentamiento y colocación de la cabeza como para mantener la rosca fuera del cortante o del agujero. Asimismo, en el lado de la tuerca y después de la arandela plana se pondrá una arandela de muelle (grower) para asegurar el apriete del tornillo.

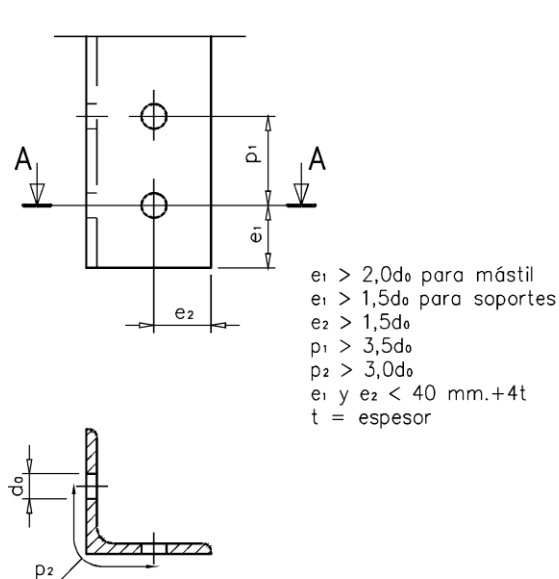
Los pares de apriete se realizarán manual o mecánicamente y se comprobará el par dejado mediante llave dinamométrica. Practicado el apriete el tornillo se efectuará un graneteado en, al menos, tres puntos.

No se permitirán uniones estructurales de barras principales atornilladas con un solo tornillo, necesitando como mínimo dos.

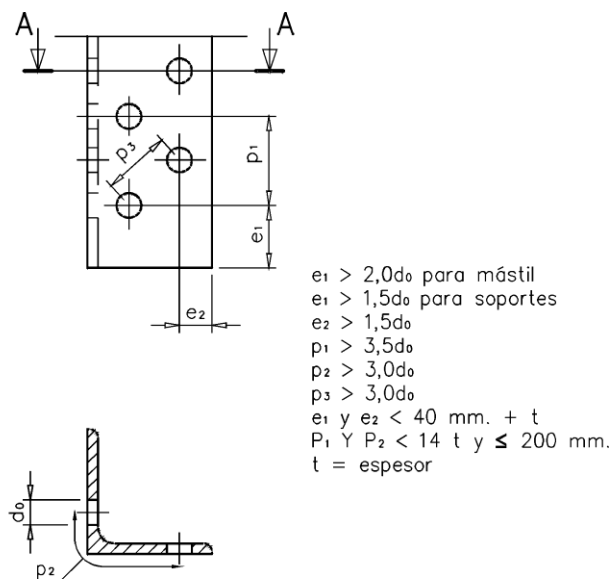
Se dispondrán de forros en todas las uniones indicadas en los planos, de forma que la holgura máxima no supere 2 mm.

La calidad de los tornillos será 8.8 en todas las uniones.

Las distancias entre los centros de agujeros y a bordes de diámetro d_0 y espesor t cumplirán con las distancias mínimas y máximas indicadas a continuación:



SECCIÓN A-A



SECCIÓN A-A

3.3.2 Uniones soldadas y plegadas

Las uniones soldadas se efectuarán siempre en taller y antes del recubrimiento mediante galvanizado.

Los cordones se depositarán sin provocar mordeduras. Después de ejecutar cada cordón de soldadura, y antes de ejecutar el siguiente, se limpiará su superficie con piqueta y cepillo de alambre, eliminando todo rastro de escoria. Esta limpieza se realizará también en los cordones finales. Para facilitar la limpieza y el depósito de los cordones siguientes se procurará que la superficie de todo cordón sea lo más regular posible y que no forme ángulos demasiado agudos con los anteriores depositados ni con los bordes de las piezas. La proyección de gotas de soldadura se evitará cuidadosamente.

Los elementos provisionales de fijación para el montaje, como son los puntos de soldadura, se eliminarán mediante piedra esmeril, fresa, lima u otros procedimientos. Estos puntos deberán eliminarse por completo una vez realizada parcialmente la soldadura.

Se recomienda que el cebado del arco se haga sobre juntas, y avance respecto a la soldadura. Si es preciso, la soldadura se recargará o esmerilará para que tenga el espesor debido, sin falta ni bombeo excesivo, y para que no presente discontinuidades o rebabas.

Todas las soldaduras a tope se efectuarán con penetración completa, considerando como aquella a la que se produce una penetración completa y una fusión entre el material de base y el de aportación, en todo el espesor de la unión.

En las soldaduras a tope, accesibles por ambas caras, se realizará siempre la toma de raíz que consiste en su saneado y el depósito del cordón de cierre, o del primer cordón dorsal. El saneado consiste en levantar la parte de raíz hasta dejar al descubierto el metal sano de la soldadura, por cualquiera de los procedimientos sancionados en la práctica.

Se prohíbe todo enfriamiento anormal o excesivamente rápido de las soldaduras, siendo preceptivo tomar las precauciones precisas para ello.

Será requisito imprescindible para homologar al fabricante presentar la homologación de los soldadores según algún código al uso, preferiblemente, ASME IX.

CAPÍTULO 4

MODIFICACIONES PROPUESTAS

4.1 Introducción.

Existen torres de sección triangular, de diferentes configuraciones, como alternativa también a las de sección cuadrangular.

Las hay constituidas por perfiles angulares en su totalidad, por montantes tubulares y diagonales de perfil angular, etc.

Las primeras, debido a que los LPN forman 90 grados entre sus alas, requieren la utilización de cartelas soldadas o atornilladas para conseguir los 60 grados que forman los lados del triángulo equilátero de la sección.

Dos son las tipologías más habituales. Una primera (Figura 1) en la que los vértices de los tres montantes coinciden con los del triángulo. Requieren cartelas en todas las alas (6) lo que conlleva gasto en material y mano de obra, pues generalmente estas placas van soldadas. Un segundo modelo hace coincidir un ala de dos montantes con un lado del triángulo y el tercer montante, con el nervio situado en el tercer vértice de la sección. Necesitan cuatro cartelas para la perfecta colocación de las diagonales (Figura 2).

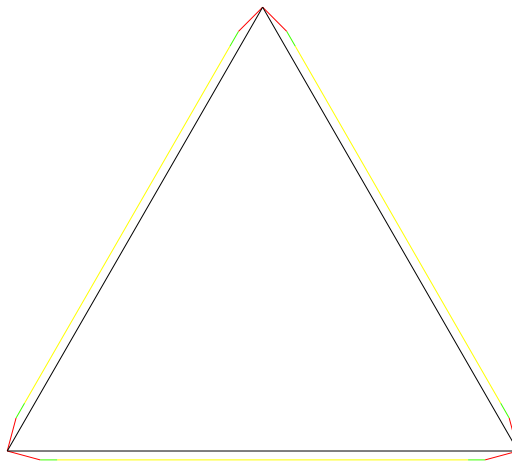


Figura 1. Planta de torre de sección triangular con vértices coincidentes

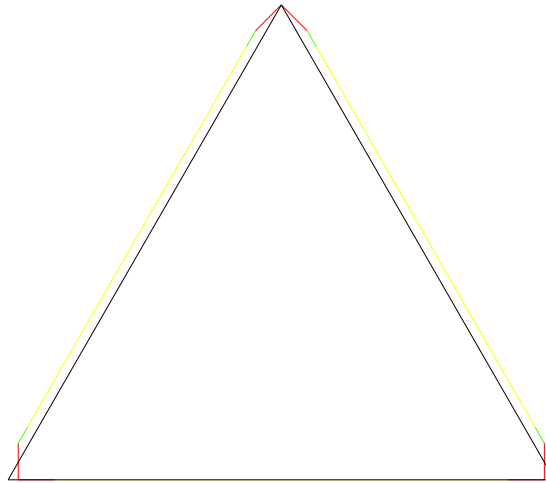


Figura2. Planta de torre de sección triangular con 2 vértices coincidentes

Las torres triangulares de montantes tubulares son más caras, por el hecho de utilizar este tipo de perfil en su fabricación.(Figura 3)

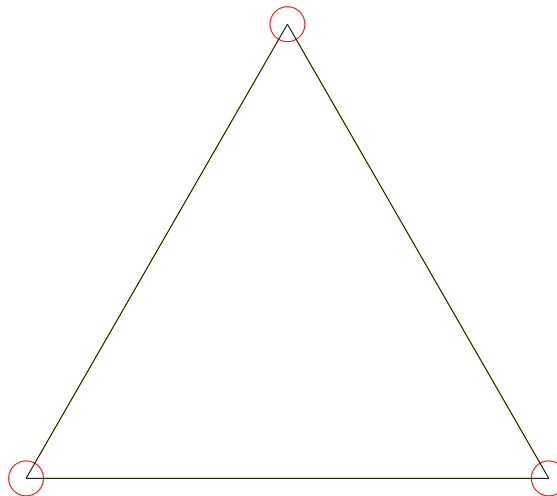


Figura 3. Planta de torre de sección triangular con montantes de perfil tubular.

4.2 Alternativa propuesta. El mástil ACME.

El mástil ACME, diseñado a partir de perfiles angulares y debido a su peculiar orientación de los montantes, reduce costes respecto a las anteriores configuraciones por un menor uso de cartelas, y por el uso de perfiles no sólo normalizados, sino fáciles de encontrar en el mercado y más económicos que los tubos estructurales.(Figura 4)

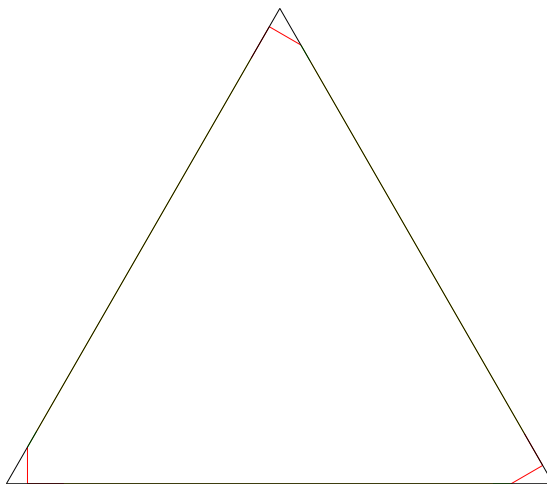


Figura 4. Planta de torre tipo ACME, con los montantes girados

Este diseño ofrece una considerable mejoría en varios aspectos.

Por un lado, la sección triangular permite la orientación de las antenas a 120 grados sin necesidad de herrajes especiales como sucede en las de sección cuadrangular.

Esta orientación es la habitual en la red de antenas, por la peculiar configuración en forma de panal.

(Figura 5).

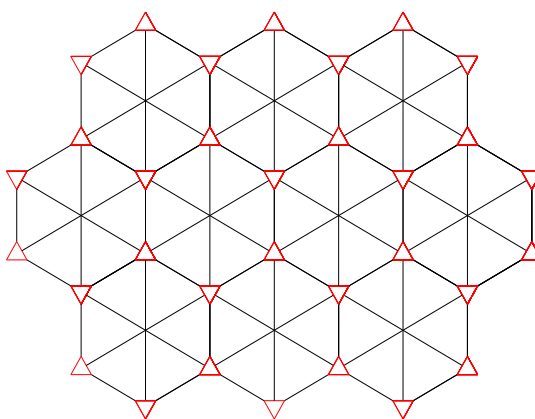


Figura 5. Disposición de tipo panal de torres de comunicaciones.

La reducción de cuatro a tres lados conlleva una disminución en el peso de la torre y por tanto de los costes de material, fabricación y montaje que repercuten en el precio final.

Además se ha buscado estandarizar la fabricación de los montantes para reducir tiempos y por tanto costes. Esta estandarización facilita también la clasificación, el transporte de la torre desde el lugar de fabricación al emplazamiento final y el montaje.

En realidad el diseño se ha orientado a toda la familia de torres desde 15 metros de altura hasta 40 metros. Se trata de tramos de 5 metros cuya combinación permite formar las siguientes alturas normalizadas (Figura 6):

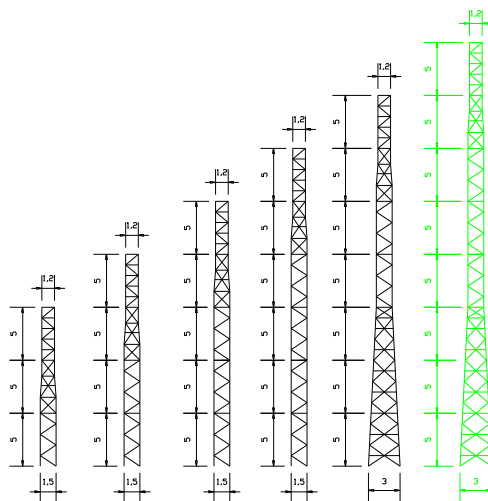


Figura 6. Familia de mástiles ACME desde 15 a 40 metros.

- Mástil de 15 metros: Tramos 1-emp-fin.
- Mástil de 20 metros: Tramos 1-2-emp-fin.
- Mástil de 25 metros: Tramos 1-2-3-emp-fin.
- Mástil de 30 metros: Tramos 1-2-3-4-emp-fin.
- Mástil de 35 metros: Tramos A1-A2-A3-2-3-emp-fin.
- Mástil de 40 metros: Tramos A1-A2-A3-2-3-4-emp-fin.

El tramo inferior (tramo 0) estará embutido en la cimentación y servirá de arranque para la formación del fuste. La zapata o cimentación se ejecutará para soportar la altura máxima normalizada de cuarenta metros, independientemente de la altura solicitada en cada emplazamiento.

Toda la familia de fustes ACME consta de una serie de tramos de lado 1,5 metros y 5 metros de altura que forman, prácticamente, la parte resistente de la estructura. El tramo de empalme es común a todos los modelos y es el que permite la transición de una sección triangular de lado 1,5 a otra de lado 1,2 metros para poder situar el tramo final, que será en el que se sitúen las antenas.

Todos los tramos son de 5 metros de altura, lo que, como se decía antes, permite un ahorro de material, y un más fácil transporte por cualquier medio.

Los tramos A1, A2 y A3 son troncopiramidales. Utilizados en los dos mástiles de mayor altura hacen que la torre arranque desde una sección triangular en la base de 3 metros de lado, dotándoles de mayor estabilidad.

Hay tres tipos de montantes que son especiales.

En el tramo A1, hay que plegar los montantes a un metro de la punta inferior, para poder lograr la vertical y así poder unirlos con el tramo embebido en la cimentación.

El tramo A3 necesita recuperar la vertical para coser con el tramo 2, por tanto se plegarán sus montantes hacia afuera a un metro del extremo.

El tramo de empalme, para poder realizar la transición, necesita ser doblado en los dos extremos.

En el inferior hacia adentro, a un metro y medio del extremo, y en el superior hacia afuera.

Estas transformaciones no afectan a la resistencia del acero, ni a la estabilidad estructural de la torre.

Se realizarán por corte con soplete y soldadura a tope con preparación de bordes.

Como se decía antes, la búsqueda de la estandarización en la fabricación conlleva una serie de ventajas.

Esta estandarización consiste en realizar todos los montantes de la misma longitud (5 metros), lo que permite ahorrar tiempos de fabricación en la operación de corte a medida.

Los perfiles comerciales tienen una longitud de partida de 6 ó 12 metros. El hecho de dar a los montantes esa longitud de 5 metros permite utilizar las puntas sobrantes de 1 metro de longitud para la fabricación de los cubrejuntas y cupones. De esta manera el aprovechamiento de material también es máximo.

Al aplicar el mismo gramil a todos los montantes favorece la utilización de una sola plantilla para el marcado y punzonado o taladrado de los mismos, lo que también ahorra tiempo y costes en este proceso.

La elección de los perfiles y su disposición permite evitar el uso de forros, y así reducir material y por tanto, peso.

En este documento se analiza el diseño del mástil de 40 metros, por ser el que incluye más elementos y sobre el que se puede desarrollar y terminar de afinar el diseño de toda la familia ACME.

La carga de antenas a la que se somete este modelo es la misma que la de las torres cuadradas de Telefónica tipo M4:

- 4 antenas colineales y 3 parábolas de ϕ 0,6 m en cota nominal.
- 6 antenas de panel de 2,5x0,3 m y 6 antenas de panel de 1,5x0,2 m, situadas a 1 metro de cota nominal.
- 6 antenas de panel de 2x0,175 m y 6 antenas de panel de 1,5x0,2 m, situadas a 4 metros de cota nominal.

También se respeta la especificación de la colocación de las plataformas de trabajo y descanso como máximo cada 9 metros, pues la estructura está preparada para alojar dichas plataformas como máximo cada 5 metros.

La escalera está formada por angulares verticales de L50x50x5, unidos por peldaños formados por redondos macizos de $\phi 20$ mm, soldados a los angulares verticales, y separados 250 mm entre sí. La anchura o separación entre los bordes de los montantes verticales será de 400 mm.

El resto de accesorios también se han tenido en cuenta para los cálculos.

CAPÍTULO 5

CALCULOS JUSTIFICATIVOS

5.1 Descripción general

En este apartado se describen las hipótesis de cálculos y la justificación dimensional de los perfiles, elementos de unión adoptados y accesorios.

El mástil debe calcularse para soportar una velocidad de viento de proyecto (V_C), que será la mayor de 165 km/h (45,8 m/s) y la velocidad de viento básica en condiciones medias.

El diseño será capaz de soportar como mínimo la configuración de antenas definida en el anteriormente y que es la siguiente:

- 4 antenas colineales y 3 parábolas de ϕ 0,6 m en cota nominal.
- 6 antenas de panel de 2,5x0,3 m y 6 antenas de panel de 1,5x0,2 m, situado a 1 metro de cota nominal.
- 6 antenas de panel de 2x0,175 m y 6 antenas de panel de 1,5x0,2 m, situado a 4 metros de cota nominal.

Las cargas de antenas sobre el mástil se han obtenido de los datos facilitados por los diferentes suministradores, o en su defecto en función de las características físicas, se han obtenido las cargas equivalentes.

Para el cálculo de cargas aplicar sobre el mástil se ha seguido la Norma DIN 4131. El dimensionamiento de las misma se ha efectuado con la NBE.

En cuanto al cálculo y dimensionamiento de la cimentación se ha efectuado por el método de Sulzberger y con las consideraciones establecidas en la EHE.

5.2 Hipótesis de cálculo

5.2.1 Acciones adoptadas para el cálculo

En el cálculo se considerarán las siguientes acciones:

- Acciones gravitatorias.
- Acciones del viento.

No se consideran las acciones reológicas ni las acciones del terreno.

Se considerarán los siguientes casos de carga, compuestos de diversas acciones:

Caso 1:

- 1.1 Pesos.
 - Pesos del fuste, incluidos elementos como escalera, cableado, etc.
 - Pesos de soportes y antenas.
- 1.2 Sobrecargas.
 - Peso de dos operarios trabajando sobre los soportes de antenas.
- 1.3 Carga de viento.
 - Viento incidente a 165 km/h (45,8 m/s) a 0° (viento frontal).
 - Ráfaga de viento incidente.

Caso 2:

- 2.1 Pesos.
 - Pesos del fuste, incluidos elementos como escalera, cableado, etc.
 - Pesos de soportes y antenas.
- 2.2 Sobrecargas.
 - Peso de dos operarios trabajando sobre los soportes de antenas.
- 2.3 Carga de viento.
 - Viento incidente a 165 km/h (45,8 m/s). Viento paralelo a una cara.
 - Ráfaga de viento incidente.

Caso 3:

- 3.1 Pesos.
 - Pesos del fuste, incluidos elementos como escalera, cableado, etc.
 - Pesos de soportes y antenas.
- 3.2 Sobrecargas.
 - Peso de dos operarios trabajando sobre los soportes de antenas.
- 3.3 Carga de viento.
 - Viento incidente a 165 km/h (45,8 m/s) a 180°
 - Ráfaga de viento incidente y a 45°.

Caso 4:

- 4.1 Pesos.
 - Pesos del fuste, incluidos elementos como escalera, cableado, etc.
 - Pesos de soportes y antenas.
- 4.2 Sobrecargas.
 - Peso de hielo.
 - Peso de nieve sobre plataformas y soportes.
 - Peso de dos operarios trabajando sobre los soportes de antenas.
- 4.3 Cargas de viento:
 - 75 % Viento incidente a 165 km/h (45,8 m/s).
 - 75 % Ráfaga de viento incidente.

5.2.2 Requisitos de cálculo

El mástil se ha de calcular para cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Situación topográfica expuesta correspondiente a una velocidad mínima de 165 km/h.
- b) La presión que el viento ejerce sobre la estructura se supondrá constante en toda su altura y será la ejercida para la velocidad de viento indicada en el punto anterior.
- c) En las condiciones más desfavorable de carga y de incidencia de viento, el acero no alcanzará la tensión admisible correspondiente a cada tipo.
- d) El ángulo máximo admisible formado entre el eje vertical del mástil en reposo y el obtenido por la presión ejercida a la velocidad de viento de diseño (165 km/h) con todas las cargas aplicadas y en la peor situación de incidencia de viento, no será superior a un grado y medio ($1,5^{\circ}$) sexagesimal.
- e) La esbeltez máxima en las piezas sometidas a compresión en las barras de trabajo no será superior a 150. Para las barras secundarias o de arriaostamiento y traccionadas será de 200.

Se define como barras principales o de trabajo, aquellas que son imprescindibles desde el punto de vista estructural (montantes y diagonales). Se entienden como barras que no trabajan aquellas que se colocan para reducir la esbeltez de barras principales o por sujeción de soportes.

- f) Las barras horizontales se diseñan para que además de soportar una carga puntual de 200 Kg situada en su centro o una repartida de 250 Kg.m⁻¹ , sin sobrepasar la tensión admisible y una flecha de $l/250$.

- g) El dimensionamiento se realizará considerando las condiciones más desfavorables de los casos de carga indicados anteriormente. Para el cálculo de incidencia de viento a 45° se considerará un coeficiente de incidencia oblicua k cuyo valor no será inferior a $k=1,1$.
- h) Para el dimensionamiento de la perfilera sometida a compresión se efectúa mediante la aplicación de los coeficientes ω y cuando estén sometidos a tracción se verifica su dimensionamiento con la sección neta, es decir, descontando los agujeros de los tornillos.

5.3 Estimación de cargas sobre el mástil

5.3.1 Cargas gravitatorias

Se consideran las siguientes cargas:

Peso propio del fuste

El peso del fuste se ha estimado a partir de las longitudes de barra, secciones de cada una de ellas y densidad del material. El resultado obtenido ha sido:

$$P_{fuste} = 7.012 \text{ kg}$$

Peso de los accesorios

El peso estimado de los accesorios (plataformas de trabajo, cables guiaondas, escaleras, etc.) junto con el peso que se adquiere en el galvanizado y pintura puede estimarse en el 25 % del peso propio del fuste.

Para los elementos y soportes de antenas se consideran los siguientes pesos:

-Antenas colineales y pararrayos	250 kg
-Antenas parabólicas	300 kg
-Antenas en cota 39	125 kg
-Antenas en cota 36	330 kg
Total	1.005 Kg

En los pesos indicados anteriormente, se incluyen los pesos de las propias antenas.

Peso total

El peso total considerado será el siguiente:

$$P_p = P_{fuste} + 25\% P_{fuste} + P_{accesorios} = 7.012 + 1753 + 1.005 = 9.770 \text{ kg}$$

Sobrecargas gravitatorias

Las sobrecargas gravitatorias consideradas son las correspondientes a la formación de hielo sobre la estructura y plataformas, y las cargas de instalación o mantenimiento.

Para la estimación de carga de hielo sobre la estructura se supone que se formará una capa de 3 cm de grueso por todos los lados, en todas las barras del fuste. Para el cálculo se considera el peso específico del hielo en $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$.

Por lo tanto, y por tramos, según los perfiles:

$$P_{hielo} = \text{perímetro perfil} \cdot \text{espesor} \cdot \text{longitud barra} \cdot \rho$$

tramo	peso del hielo
A1	759,18
A2	629,45
A3	673,44
2	400,68
3	374,22
4	336,42
EMP	398,16
FIN	286,44

Tabla 1. Sobrecarga de hielo repartida en los nudos, según tramos.

En el cálculo se considera que la magnitud de carga de hielo permite suponer que la carga de nieve (para altitudes por encima de 2.000 m se debe considerar 200 kg/m^2 sobre plataformas) queda absorbida dentro de la de hielo.

Por lo tanto el peso total de hielo que soporta la estructura será:

$$P_{hielo} = 3.858 \text{ Kg.}$$

5.3.2 Determinación de la carga del viento

Se define como carga de viento aquella de naturaleza variable producida por la acción del viento sobre la estructura resistente o sobre los elementos no estructurales que incidan sobre ella. El Estado de Viento de Proyecto quedará definido por los parámetros de velocidad de viento y dirección.

Los valores representativos de la Carga de Viento se obtendrán a partir de la determinación del Estado de Viento de Proyecto en la localización geográfica considerada.

En el cálculo de la acción del viento sobre la estructura y accesorios se considerarán los siguientes factores:

- Velocidad de viento.
- Presión dinámica.
- Coeficiente de fuerza efectivo (coeficiente eólico).
- Efectos dinámicos por ráfaga.

Velocidad de viento

El cálculo de la estructura se efectuará para soportar velocidades y ráfagas de viento de 165 km/h.

Presión dinámica

La presión dinámica, q_z utilizada para calcular la acción que ejerce el viento sobre los obstáculos, viene definido por:

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2 \quad \text{donde :}$$

$\rho = \text{densidad del aire.}$
 $V_z = \text{velocidad del viento.}$

La densidad del aire adoptada es 1,225 kg/m³ (1,23 kg/m³), correspondiente al aire en un lugar situado a la altura del mar y a 15 °C. Dado que la densidad del aire varía con la temperatura y altitud, se efectuará correcciones en lugares fríos a altitudes bajas, en los que la densidad real sea mayor en un 10 % de la adoptada.

Por lo tanto la presión ejercida será:

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(\frac{165 \cdot 10^3}{3.600} \frac{m}{s} \right)^2 = 1.285 \frac{N}{m^2} = 131 \frac{kg}{m^2}$$

Coeficiente eólico

El coeficiente eólico de las antenas son los aportados por el fabricante de las mismas que, generalmente, se obtienen mediante ensayos en túneles de viento. En ausencia de este dato se adoptará como coeficiente un valor mínimo de 1,45.

Seguidamente se indican los cálculos efectuados para la obtención de la carga de viento por cada uno de los soportes de antenas, sobre el fuste, y sobre los guías y escaleras.

Antenas Omni

De los datos del fabricante y para la antena más desfavorable de 4,38 m, se obtiene que los esfuerzos al viento considerados son:

Esfuerzo sobre la antena para 165 km/h:

$$F_{150Km/h} = 10,2 kg \cdot F_{165Km/h} = F_{150Km/h} \cdot \left(\frac{V_{165}}{V_{150}} \right)^2 = 10,2 \cdot \left(\frac{165}{150} \right)^2 = 12,5 kg$$

Para el cálculo de las 4 antenas se considera el esfuerzo de cada una de ellas y el esfuerzo de las dos ménsulas de tubo rectangular de 70x50 mm de dos metros de longitud, así como la carga debida al pararrayos, por tanto:

$$F_{mensula} = superficie \cdot presión \cdot coeficiente eólico = 0,07 \cdot 2 \cdot 131 \cdot 1,2 = 22 kg$$

$$F_{pararrayos} = superficie \cdot presión \cdot coeficiente eólico + punta = 7 \cdot 0,06 \cdot 131 \cdot 0,8 + 6 = 44 + 6 = 50 kg$$

$$F_{total} = 4 \cdot F_{antena} + 2 \cdot F_{mensula} + F_{pararrayos} = 4 \cdot 12,5 + 2 \cdot 22 + 50 = 144 kg$$

Parábolas

Para obtener, de forma aproximada y conservadora, el esfuerzo de empuje de las tres parábolas de 0,6 m de diámetro, se considera el ángulo de incidencia mas desfavorable y el esfuerzo total ejercido por cada una de ellas, por lo tanto:

$$F_{total} = 3 \cdot \left\{ F_{150Km/h} \cdot \left(\frac{V_{165}}{V_{150}} \right)^2 + herraje \right\} = 3 \cdot \left\{ 50,3 \cdot \left(\frac{165}{150} \right)^2 + 4 \right\} = 195 kg$$

Antenas en cota 39:

- Antena de GSM-900, de los datos del fabricante se obtiene un valor de 134 kg a 150 km/h, por lo que el valor unitario a 165 km/h será:

$$F_{antena-1} = F_{150km/h} \left(\frac{V_{165}}{V_{150}} \right)^2 = 134 \cdot \left(\frac{165}{150} \right)^2 = 162 \text{ kg}$$

- Antena de 1,5x0,2 m; se considera el siguiente esfuerzo unitario:

$$F_{antena-2} = superficie \cdot presión \cdot coeficiente eólico = 1,5 \cdot 0,2 \cdot 131 \cdot 1,45 = 57 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta la disposición mas desfavorable, y considerando 2 antenas por sector por cada tipología de antena, así como un factor de sombra de 0,9 para las antenas situadas en ambos lados posteriores, se obtiene:

$$F_{39} = (2 \cdot F_{-1} + 2 \cdot F_{-2}) + [2 \cdot (2 \cdot F_{-1} + 2 \cdot F_{-2}) \cdot \cos 60^\circ \cdot factor\ sombra] = (2 \cdot 162 + 2 \cdot 57) + [2 \cdot (2 \cdot 162 + 2 \cdot 57) \cdot \cos 60^\circ \cdot 0,9] = 832 \text{ kg}$$

Antenas en cota 36:

Estableciendo las mismas hipótesis que en las anteriores antenas, el esfuerzo obtenido será:

- Antena de 2x0,175 , el esfuerzo será:

$$F_{antena-1} = superficie \cdot presión \cdot coeficiente eólico = 2 \cdot 0,175 \cdot 131 \cdot 1,45 = 67 \text{ kg}$$

- Antena de 1,5x0,2 m; se considera el siguiente esfuerzo unitario:

$$F_{antena-2} = superficie \cdot presión \cdot coeficiente eólico = 1,5 \cdot 0,2 \cdot 131 \cdot 1,45 = 57 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta la disposición mas desfavorable, y considerando 2 antenas por sector por cada tipología de antena, así como un factor de sombra de 0,95 para las antenas situadas en ambos lados posteriores, se obtiene:

$$F_{36} = (2 \cdot F_{-1} + 2 \cdot F_{-2}) + [2 \cdot (2 \cdot F_{-1} + 2 \cdot F_{-2}) \cdot \cos 60^\circ \cdot factor\ sombra] = (2 \cdot 67 + 2 \cdot 57) + [2 \cdot (2 \cdot 67 + 2 \cdot 57) \cdot \cos 60^\circ \cdot 0,95] = 484 \text{ kg}$$

En resumen, y con las cargas ya distribuidas en los nudos:

ANTENAS	PESO		COTA	VIENTO1	VIENTO2	VIENTO3
OMNI	250,00		40,00	144,00	144,00	144,00
PARABOLA	300,00		40,00	195,00	195,00	195,00
COTA 39	125,00		39,00	832,00	832,00	832,00
COTA 36	330,00		36,00	484,00	484,00	484,00
	1005,00			275,83	275,83	275,83

Tabla 2. Sobrecarga de antenas repartida en los nudos

Fuste

El cálculo del esfuerzo de viento sobre el fuste se ha efectuado mediante la siguiente expresión, según DIN 4131:

$$(1) \quad W = c \cdot k \cdot q_z \cdot F \quad (kg)$$

siendo:

F = superficie neta (real) o expuesta que el elemento presenta al viento en m^2 .

k = coeficiente de incidencia oblicua. Se ha tomado 1,1 en todos los casos.

q_z = presión dinámica del viento en kg/m^2 . Para 165 km/h vale 131 kg/m^2 .

c = coeficiente de forma que depende del factor de opacidad de la torre ϕ .

$\phi = F/F_u$; siendo F_u = superficie bruta, o total, encerrada por el contorno lateral externo, o sea la que el mismo elemento presentaría al viento si se obturasen todos sus huecos, en m^2 .

Los valores de c se obtienen, según DIN 4131:

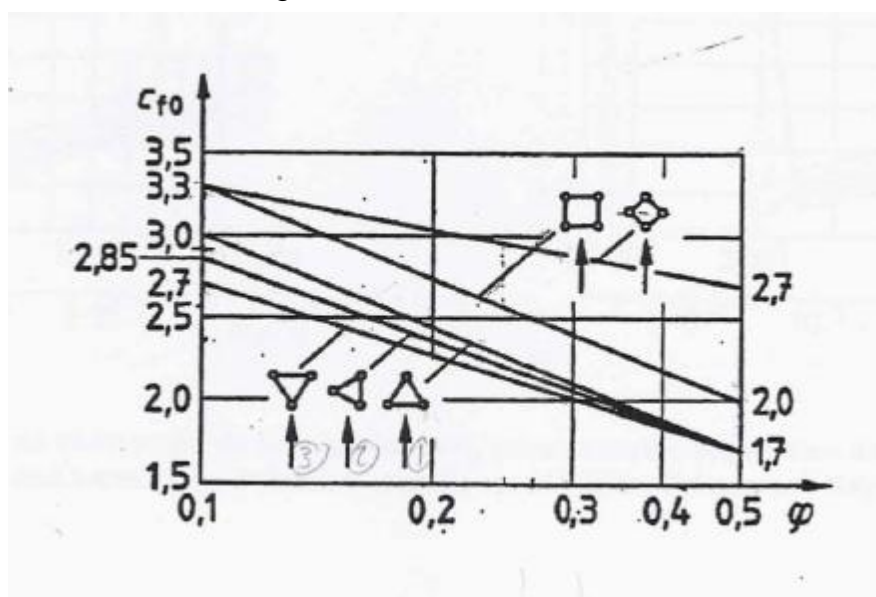


Figura 7. Factores de corrección de fuerza básica para paredes de celosías espaciales de barras angulosas en función del grado de totalidad ϕ

Por lo tanto, los esfuerzos por el viento considerados en los diferentes tramos una vez aplicado la expresión (1) anterior se indica en la siguiente tabla :

TRAMO	REAL	APARENTE	A_r/A_a	C_{f1}	C_{f2}	C_{f3}	W_1	W_2	W_3
1A	3,01	13,75	0,22	2,54	2,44	2,36	185,02	177,94	171,48
2A	2,50	11,25	0,22	2,53	2,43	2,35	152,77	146,98	141,69
3A	2,67	8,75	0,31	2,25	2,19	2,13	145,22	141,19	137,67
1	1,59	7,50	0,21	2,57	2,47	2,37	98,64	94,78	91,25
2	1,59	7,50	0,21	2,57	2,47	2,37	98,64	94,78	91,25
3	1,49	7,50	0,20	2,62	2,51	2,41	93,97	90,14	86,61
4	1,34	7,50	0,18	2,69	2,58	2,47	86,91	83,15	79,69
5	1,23	7,50	0,16	2,75	2,62	2,51	81,68	78,01	74,62
6	1,13	7,50	0,15	2,80	2,67	2,55	76,48	72,91	69,61
EMPALME	1,58	6,75	0,23	2,49	2,40	2,31	95,00	91,54	88,39
FINAL	1,14	6,00	0,19	2,65	2,54	2,44	72,81	69,76	66,96

Tabla 3. Cargas de viento sobre el fuste repartidas en nudos según tramos

Donde ya se han distribuido las cargas en los nudos.

En amarillo figuran los tramos que no corresponden a la configuración de la torre de 40 metros.

Y para el caso en que se tiene en cuenta la sobrecarga de hielo:

TRAMO	REAL	APARENTE	Ar/Aa	C _{f1}	C _{f2}	C _{f3}	Wi
1A	4,82	14,13	0,34	1,90	1,90	1,90	221,38
2A	3,96	11,69	0,34	1,90	1,90	1,90	181,98
3A	4,25	9,16	0,46	1,70	1,70	1,70	174,78
1							
2	2,52	7,89	0,32	2,00	2,00	2,00	121,81
3	2,42	7,89	0,31	2,00	2,00	2,00	116,73
4	2,27	7,89	0,29	2,00	2,00	2,00	109,48
5							
6							
EMPALME	2,96	7,22	0,41	1,80	1,80	1,80	128,77
FINAL	2,26	6,38	0,35	1,90	1,90	1,90	103,81

Tabla 4. Carga de viento sobre el fuste en presencia de hielo repartido en los nudos, según tramos

En este caso se obvian los valores para los tramos que no pertenecen a la torre de 40 metros.

Escaleras y guiaondas

La presión de viento aplicada por escaleras y guiaondas se efectúa con la expresión (1) indicada anteriormente, considerando un coeficiente de sombra o reducción de un 25 %.

Considerando la solución adoptada en la escalera formada por dos montante de L50 y peldaños redondos de $\phi 20$ y 30 cm de ancho. Seguidamente se obtiene la superficie neta F obtenida por unidad de longitud (en los peldaños se han considerado 4 peldaños por metro y coeficiente de forma por superficie circular de valor 0,7) :

$$Escalera = F_{L50} \cdot n^{\circ} montantes + F_{peldaños} \cdot n^{\circ} ud/m \cdot Cf = 0,05 \cdot 2 + 0,02 \cdot 0,34 \cdot 0,7 = 0,1168 \text{ m}^2/m$$

En el caso de los soportes guiaondas se considera un perfil L40 de longitud 1 m y espaciados cada 1,5 m, y 30 cables de 7/8", por lo tanto:

$$Guiaondas = F_{L40} \cdot n^{\circ} ud/m + F_{cable} \cdot n^{\circ} cables \cdot Cf = 0,04 \cdot \frac{1}{1,5} + 0,022 \cdot 30 \cdot 0,7 = 0,489 \text{ m}^2/m$$

El valor de c , será, en función del grado de totalidad

$$\Phi = \frac{F}{F_u} = \frac{0,49 + 0,12}{1} = 0,61 \text{ m}^2$$

$$C=1,6$$

y la fuerza por unidad de longitud para escalera y guiaondas, será:

$$W = q \cdot c \cdot F \cdot Cf = 132 \cdot 1,6 \cdot 0,61 \cdot 0,25 = 37 \text{ kg/m}$$

	C_{f1}	C_{f2}	C_{f3}	W_1	W_2	W_3
esc + guia	1,60	1,60	1,60	5,36	5,36	5,36

Tabla 5. Carga de viento en escaleras y guiaondas repartidas en los nudos

Efecto de impacto de ráfaga de viento

Para el cálculo de la presión dinámica a aplicar por ráfaga de viento, se ha efectuado según la recomendación de la Norma DIN 4131, en la que se indica que la presión dinámica vale:

$$q_d = \phi \cdot \beta \text{ (kg/m}^2\text{)}; \text{ donde } \phi = 70 \text{ kg/m}^2$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha^2} \sqrt{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \sin \frac{\pi}{2 \cdot \alpha}} \text{ y}$$

$$\alpha = \frac{T}{4 \cdot D}$$

En la expresión anterior T es el periodo propio del mástil que se ha estimado en 1,7 segundos (cálculo dinámico) y D el tiempo de desarrollo de la ráfaga que se considera de valor 2 segundos. Por lo tanto se tiene:

$$\alpha = \frac{T}{4 \cdot D} = \frac{1,7}{4 \cdot 2} = 0,21$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha^2} \sqrt{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \sin \pi / 2 \cdot \alpha} = \frac{0,21}{1 - 0,21^2} \sqrt{1 + 0,21^2 - 2 \cdot 0,21 \cdot \sin \pi / 2 \cdot 0,21} = 0,22$$

$$q_d = \phi \cdot \beta = 70 \cdot 0,22 = 15,29 \text{ kg/m}^2$$

5.4 Modelo computacional empleado: dimensionamiento y resultados.

El modelo matemático empleado para efectuar los cálculos, se ha realizado espacialmente (modelo 3D) mediante la generación de nudos y barras cuya geometría corresponde con las dimensiones físicas del fuste. El programa de cálculo utilizado es el ALCE.

El mástil se ha dividido en 8 tramos y cada tramo contiene barras con las mismas características mecánicas. Todos los nudos de unión entre barras verticales (montantes) se consideran empotrados. Lo mismo sucede entre las uniones de las diagonales.

Por tanto, se ha calculado como pórtico rígido y no como celosía.

En cualquier caso, una vez se observan los resultados obtenidos, se comprueba que el comportamiento de la estructura se aproxima muy bien a una estructura articulada, pues los esfuerzos de mayor importancia son los axiles en todas las barras.

Las diferentes cargas tanto de antenas como las del fuste se han aplicado siempre repartidas sobre los nudos, como se ha indicado en las anteriores tablas.

5.4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ALCE

El programa ALCE es una aplicación informática, cuyo objeto fundamental es el cálculo general de estructuras. Es un programa desarrollado por SEMI que viene siendo utilizado, en diferentes proyectos de ingeniería, desde hace más de 20 años.

Dicha aplicación se integra, en cuanto a su funcionamiento, con el programa de diseño asistido por ordenador - AUTOCAD-. Quiere esto decir, que podemos disponer simultáneamente y de un modo interactivo de un poderoso proceso de cálculo de estructuras interpretado, en sus aspectos gráficos, por AUTOCAD.

La solución estructural, es decir, la determinación de esfuerzos y deformaciones está basada en la aplicación del cálculo matricial a la teoría prismática, elástica, lineal, y de primer orden del cálculo de estructuras. Este proceso se resuelve de forma completamente general, lo que nos permite calcular estructuras con diferente geometría (planas o espaciales), con distintos tipos de materiales y sometidas a diversos estados de carga (puntuales, uniformes, lineales, térmicas...).

En síntesis, el método de cálculo es el siguiente:

1.- Ley de Hooke.

Se refieren los esfuerzos en las barras en función de los desplazamientos de sus extremos.

$$P = K \cdot Z$$

P - matriz de fuerzas interiores de las barras.

K - matriz de rigidez.

Z - matriz de desplazamientos de los nudos.

2.- Ecuaciones de compatibilidad.

Se expresan los desplazamientos en los extremos de las barras (coordenadas locales) en función de los desplazamientos de los nudos (coordenadas globales).

$$Z = A \cdot X$$

A - matriz de transformación.

X - desplazamientos de los nudos.

3.- Ecuaciones de equilibrio.

Se aplican las condiciones de equilibrio de fuerzas en los nudos.

$$L = A \cdot P$$

L - matriz de fuerzas exteriores.

4.- Resolución.

$$L = A' \cdot P$$

$$L = A' \cdot K \cdot Z$$

$$L = A' \cdot K \cdot A \cdot X$$

A' - traspuesta de A .

Haciendo: $A' \cdot K \cdot A = S$ matriz de rigidez en coordenadas globales.

$$L = S \cdot X$$

.

Una vez hallada X conoceremos las fueras en las barras mediante la ecuación:

$$P = K \cdot A \cdot X$$

Las rutinas fortran de inversión de matrices están basadas en los desarrollos realizados en Estados Unidos para el programa STRESS.

Una vez resuelto el problema de esfuerzos y deformaciones, en su aspecto más general, el programa realiza un tratamiento específico de las estructuras de acuerdo con el material de las mismas.

Otra característica importante del programa, en relación con las estructuras portadoras de antenas, es la posibilidad de generación automática mediante Autocad de la geometría de la torre y de las cargas de viento establecidas por las diferentes normas internacionales.

El cálculo de este tipo de estructuras ha sido contrastado en los proyectos realizados para diferentes operadores tales como: Retevision, Telefonica, Amena, Vodafone, Yoigo, Adif (GSMR Madrid-Lleida, GSMR Bilbao-Santander)

El programa, en cualquier caso, está preparado para el cálculo de mástiles de sección cuadrada o rectangular, por lo que en el caso de la torre tipo ACME, de sección triangular, el modelo en AUTOCAD ha tenido que ser generado barra a barra.

5.4.2 MODELO GENERADO:

Las dimensiones del modelo utilizado son las más aproximadas al modelo real que admite el programa.

Se han girado los ejes de los montantes para simular la distribución real de los mismos.

La longitud de las barras es aproximada, pero siempre mayorando los valores, por lo que los resultados obtenidos en cuanto a pandeo, siempre serán peores que a los que realmente se somete a la estructura.

En la siguiente tabla se indica la configuración, en cuanto a los perfiles utilizados, de todos los tramos de la familia de mástiles.

ACME	1A	2A	3A	2	3	4	empalme	final
montantes	150x18	150x18	150x16	150x16	150x14	120x12	100x10	90x8
diagonales	90x9	90x9	90x8	80x8	70x7	70x7	60x6	50x5

Tabla 6. Configuración de tramos de mástiles tipo ACME

En las siguientes figuras se observa el modelo computacional desarrollado para la ACME 40 con la estructura numerada, primero en sus nudos y posteriormente las barras.

El modelo consta de 396 barras entre montantes y diagonales, con un total de 153 nudos.

Los montantes se han dividido en barras de 1 metro, que es la longitud de pandeo, y que además simula la unión con las distintas diagonales que forman la celosía triangulada.

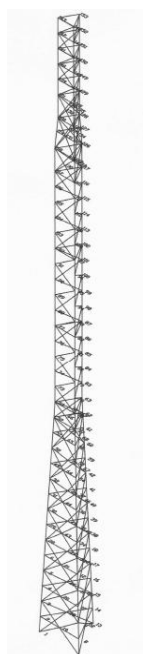


Figura 8. Modelo con nudos numerados

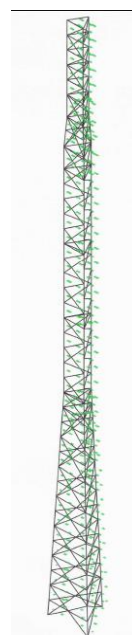


Figura 9. Modelo con barras numeradas

A continuación y a modo de ejemplo se presenta uno de los tramos que forma parte del mástil.

En concreto el tramo número 2.

Se indican en esta tabla distintos parámetros y valores necesarios para llevar a cabo los cálculos estructurales requeridos.

El resto de tramos y, por tanto, la estructura completa está definida en el ANEXO 8.5.

Tramo 2:

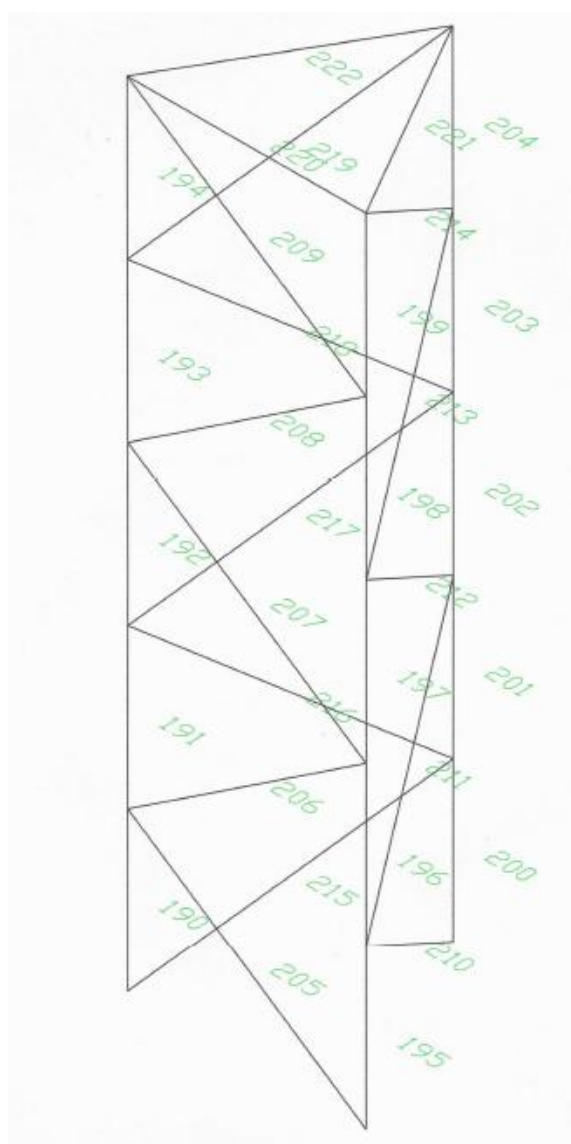


Figura 10. Tramo 2 numerado por barras.

tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
2	190	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	191	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	192	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	193	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	194	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	195	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	196	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	197	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	198	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	199	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	200	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	201	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	202	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	203	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	204	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	205	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	206	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	207	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	208	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	209	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	210	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	211	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	212	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	213	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	214	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	215	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	216	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	217	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	218	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	219	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	220	80	8	1,50	0,12	0,21	9,63	14,45	10,08
2	221	80	8	1,50	0,12	0,21	9,63	14,45	10,08
2	222	80	8	1,50	0,12	0,21	9,63	14,45	10,08
								841,85	66,78

Tabla 7. Tramo 2 por barras.

Las hipótesis adoptadas para el cálculo son las siguientes:

hipótesis	descripción
1	peso propio
2	peso de antenas y mantenimiento
3	peso de hielo
4	viento frontal sobre el fuste
5	viento paralelo a una cara sobre el fuste
6	viento posterior sobre el fuste
7	viento frontal sobre las antenas
8	viento paralelo a una cara sobre las antenas
9	viento posterior sobre las antenas
10	viento frontal con hielo
11	viento paralelo a una cara con hielo
12	viento posterior con hielo
13	caso 1:H1+H2+H4+H7
14	caso 2:H1+H2+H5+H8
15	caso3:H1+H2+H6+H9
16	caso4:H1+H2+H3+H7+H10

Tabla 8. Hipótesis de cálculo.

Solo se tiene en cuenta una de las hipótesis en condiciones de hielo, que es la más desfavorable, debido a que las cargas son las mismas en todas ellas.

En resumen, la carga total aplicada a los nudos de cada tramo serán:

<u>CARGAS EN NUDOS</u>											
	NUDO	H2	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
A1	1		274	264	255				319	319	319
	7		274	264	255				319	319	319
	13		274	264	255				319	319	319
A1+A2	6		494	476	459				581	581	581
	12		494	476	459				581	581	581
	18		494	476	459				581	581	581
A2+A3	32		437	423	410				514	514	514
	37		437	423	410				514	514	514
	42		437	423	410				514	514	514
A3+2	53		359	347	337				427	427	427
	58		359	347	337				427	427	427
	63		359	347	337				427	427	427
2+3	77		285	274	264				343	343	343
	82		285	274	264				343	343	343
	87		285	274	264				343	343	343
3+4	92		268	257	247				326	326	326
	97		268	257	247				326	326	326
	102		268	257	247				326	326	326
4+EMP	107		299	259	250				343	343	343
	112		299	259	250				343	343	343
	117		299	259	250				343	343	343
EMP + FINAL	121	-193	271	240	231	445	356	359	335	335	335
	125	-193	271	240	231	445	356	359	335	335	335
	129	-193	271	240	231	445	356	359	335	335	335
FINAL	143	-193	113	108	104	445	356	359	149	149	149
	148	-193	113	108	104	445	356	359	149	149	149
	153	-193	113	108	104	445	356	359	149	149	149
<div> <div>Z</div> <div>Y</div> <div>X</div> <div>-Y</div> <div>Y</div> <div>X</div> <div>-Y</div> <div>Y</div> <div>X</div> <div>-Y</div> </div>											

Tabla 9. Resumen de cargas en los nudos, por tramos y según dirección de aplicación en ejes globales

5.4.3 Dimensionamiento y resultados:

El dimensionamiento de los perfiles de la estructura se ha realizado mediante cálculo a pandeo de piezas sometidas a compresión, y por otro lado se ha verificado la tensión obtenida cuando la pieza se somete a tracción, según NBE-EA-95. Asimismo, se ha efectuado el dimensionamiento de los tornillos con los esfuerzos obtenidos, también con la referida norma.

Dimensionamiento del fuste

Para el cálculo de piezas sometida a compresión se ha efectuado mediante:

$$\sigma_c = \frac{N_c \cdot \omega}{S_b} \leq \sigma_{adm} \quad \text{donde :}$$

N_c = Carga de compresión;
 ω = Coeficiente de pandeo que es función de esbeltez λ
 S_b = Sección bruta

La esbeltez de cada barra se ha obtenido mediante:

$$\lambda = \frac{l_p}{i} \quad \text{donde}$$

$l_p = \beta \cdot L$
 l_p = longitud de pandeo
 L = longitud de la barra
 β = coeficiente de esbeltez
 i = radio de giro de la sección respecto del eje de inercia considerado

El valor de β de cada barra considerado es 1. El valor de ω se obtiene en función del valor la esbeltez λ de cada barra y según tipo de acero

En el caso de trabajar la barra a tracción se ha calculado mediante:

$$\sigma_t = \frac{N_t}{S_n} \leq \sigma_{adm} \quad \text{donde :}$$

$N_t = \text{Carga de tracción;}$

$S_n = \text{Sección neta}$

Teniendo en cuenta las expresiones anteriores, los resultados obtenidos se presentan resumidamente en la siguiente tabla 10, para montantes, y tabla 11 para diagonales. Se presenta únicamente el perfil más solicitado de cada tramo.

Tramo	Perfil	S_{b_2} (cm ²)	S_{n_2} (cm ²)	i (cm)	L (cm)	ω	Nc (kg)	Nt (kg)	σ_c	σ_t
A1	L150x18*	51	43	4,54	100	1,03	-93.275	71.500	1.884	1.663
A2	L150x18*	51	43	4,54	100	1,03	-88.220	68.497	1.782	1.593
A3	L150x16*	43	35	4,56	100	1,03	-83.659	66.217	2.004	1.892
2	L150x16*	43	35	4,56	100	1,03	-80.407	65.208	1.926	1.863
3	L150x14*	38	30	4,59	100	1,03	-56.771	44.812	1.539	1.494
4	L120x12*	27,5	23,5	3,65	100	1,05	-36.576	29.435	1.397	1.253
EMP	L100x10*	19,2	15,2	3,04	100	1,07	-18.022	13.874	1.004	913
FIN	L90x8*	13,9	9,9	2,74	100	1,09	-7.291	5.275	572	533

Tabla 10. Esfuerzos de tracción y compresión según tramos, en la barra más solicitada (Montantes)

Tramo	Perfil	S_{b_2} (cm ²)	S_{n_2} (cm ²)	i (cm)	L (cm)	ω	Nc (kg)	Nt (kg)	σ_c	σ_t
A1	L90x9	13,9	9,9	1,76	180	2,09	-2.140	1.867	322	188,59
A2	L90x9	13,9	9,9	1,76	156	1,71	-1.841	1.715	226	173,23
A3	L90x8	13,9	9,9	1,76	150	1,64	-2.736	2.653	323	267,98
2	L80x8	12,3	8,3	1,56	180	2,53	-4.828	4.824	993	581,20
3	L70x7	9,4	5,4	1,36	180	3,19	-4.148	4.122	1.408	763,33
4	L70x7	9,4	5,4	1,36	180	3,19	-3.512	3.496	1.192	647,41
EMP	L60x6	6,91	2,91	1,17	134	2,49	-2.268	1.774	817	609,62
FIN	L50x5	4,8	0,8	0,97	156	4,51	-1.375	1.348	1.292	1685,00

Tabla 11. Esfuerzos de tracción y compresión según tramos, en la barra más solicitada (Diagonales)

Nota (*): Acero S 355 JO.

Dimensionamiento de los tornillos

El cálculo de los tornillos de los diferentes tramos se ha efectuado comprobando su resistencia a los esfuerzos de cortadura y verificado su resistencia al aplastamiento.

El cálculo a cortadura se ha efectuado mediante:

$$N_t = 0,65 \cdot \sigma_t \cdot n_c \cdot n_{sc} \cdot S_c \rangle N_b \quad (kg)$$

donde:

N_t = Axil resistente del tornillo a cortadura en (kg).

σ_t = Tensión de trabajo del tornillo; para 8.8 vale 6.400 kg/cm².

n_c = Número de tornillos que trabajan a cortadura.

n_{sc} = Número de secciones que trabajan a cortadura.

S_c = Área resistente del tornillo a cortadura (cm²).

N_b = Axil de la barra en (kg).

La verificación a aplastamiento se ha efectuado mediante:

$$N_a = 2 \cdot \sigma_t \cdot n_a \cdot S_a \rangle N_b \quad (kg)$$

donde:

N_a = Axil resistente del tornillo a aplastamiento (kg).

σ_t = Tensión admisible del tornillo; para 8.8 vale 6.400 kg/cm²

n_a = Número de tornillos que trabajan a aplastamiento.

S_a = Área resistente del tornillo a aplastamiento (cm²).

Considerando las expresiones anteriores en las tablas siguientes se presentan, respectivamente, los resultados del dimensionamiento de los tornillos para montantes y diagonales, para los diferentes tramos del fuste.

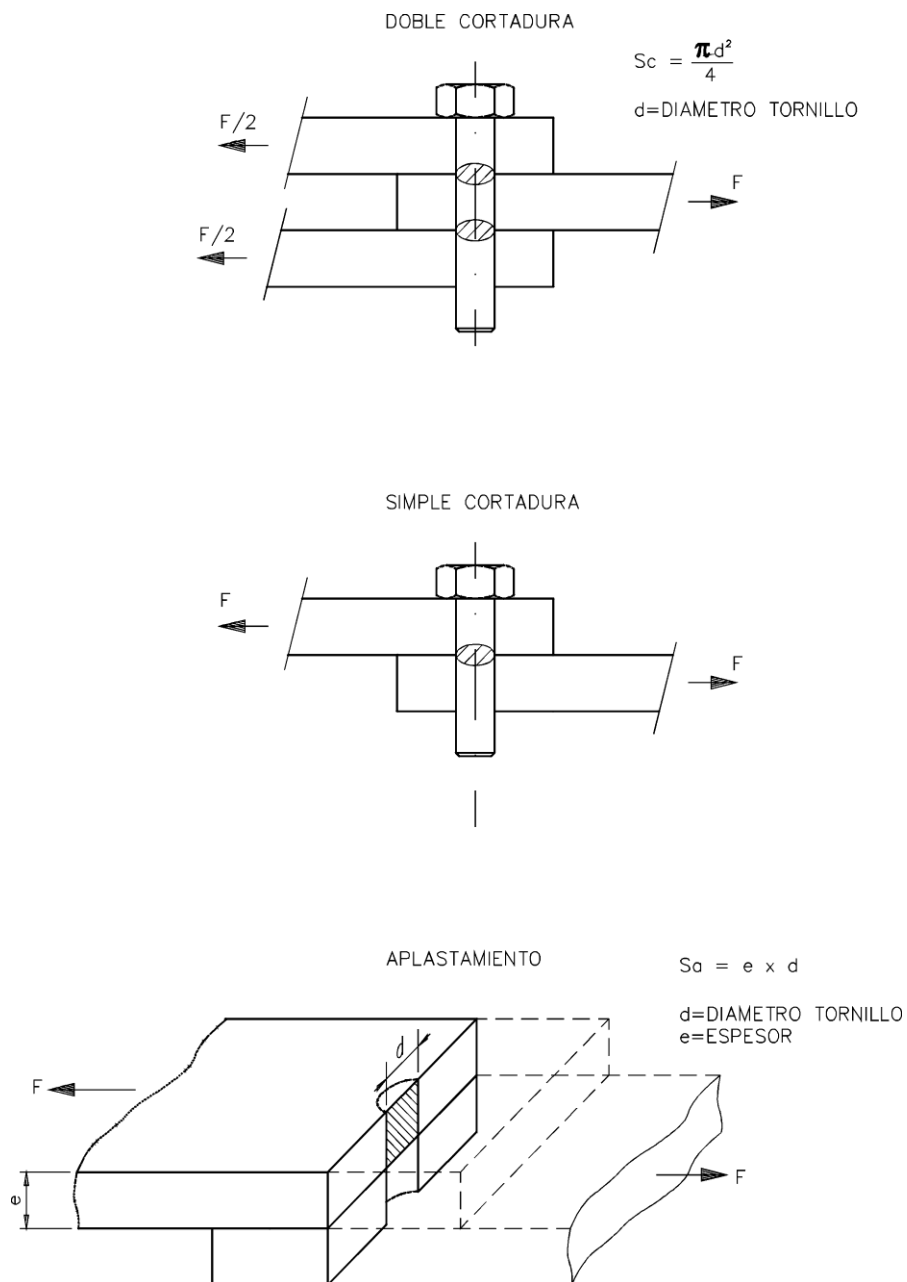


Figura 11. Criterios para el dimensionamiento de las uniones atornilladas.

TRAMO	TORNILLO	Sc	nc	nsc	Nb	Nt	Coef.Cort	Na	Coef.Apl
A1-A2	M20	3,14	8	2	88155,00	208998,40	2,37	286720,00	3,25
A2-A3	M20	3,14	8	2	84387,00	208998,40	2,48	286720,00	3,40
A3-2	M20	3,14	8	2	81746,00	208998,40	2,56	286720,00	3,51
2-3	M20	3,14	8	2	61234,00	208998,40	3,41	286720,00	4,68
3-4	M20	3,14	8	2	40328,00	208998,40	5,18	245760,00	6,09
4-EMP	M20	3,14	8	2	22712,00	208998,40	9,20	204800,00	9,02
EMP-FIN	M20	3,14	8	2	10141,00	208998,40	20,61	163840,00	16,16

Tabla 12. Dimensionamiento de los tornillos. (Montantes)

TRAMO	TORNILLO	Sc	nc	nsc	Nb	Nt	Coef.Cort	Na	Coef.Apl
A1	M16	2,01	1	1	2140,00	8359,94	3,91	18432,00	8,61
A2	M16	2,01	1	1	1841,00	8359,94	4,54	18432,00	10,01
A3	M16	2,01	1	1	2736,00	8359,94	3,06	16384,00	5,99
2	M16	2,01	1	1	4828,00	8359,94	1,73	16384,00	3,39
3	M16	2,01	1	1	4148,00	8359,94	2,02	14336,00	3,46
4	M16	2,01	1	1	3512,00	8359,94	2,38	14336,00	4,08
EMP	M16	2,01	1	1	2258,00	8359,94	3,70	12288,00	5,44
FIN	M16	2,01	1	1	1375,00	8359,94	6,08	10240,00	7,45

Tabla 13. Dimensionamiento de los tornillos. (Diagonales)

Giros y desplazamientos obtenidos

El desplazamiento y giro máximos obtenidos en el mástil se han calculado para la velocidad de viento de diseño (165 km/h), en la que se han considerado todas las cargas de los soportes de los soportes de tipología M4.

Los resultados obtenidos del desplazamiento d y giro g según los ejes globales, han sido:

Altura 40 metros y viento frontal:

-Desplazamiento d :	0,523 m
-Giro g :	0,0233 rad / 1,335°

Altura 39 metros y viento frontal:

-Desplazamiento d :	0, 499 m.
-Giro g :	0,0232 rad / 1,329°

Altura 40 metros y viento diagonal:

-Desplazamiento d :	0,514 m
-Giro g :	0,0229 rad / 1,313°

Altura 39 metros y viento diagonal:

-Desplazamiento d :	0,491 m
-Giro g :	0,0228 rad / 1,307°

Altura 40 metros y viento posterior:

-Desplazamiento d :	0,312 m
-Giro g :	0,0127 rad / 0,728°

Altura 39 metros y viento posterior:

-Desplazamiento d :	0, 299 m.
-Giro d :	0,0127 rad / 0,728°

Altura 40 metros, viento frontal + hielo:

-Desplazamiento d :	0,446 m
-Giro g :	0,0197 rad / 1,129°

Altura 39 metros, viento frontal + hielo:

-Desplazamiento d :	0,426 m
-Giro g :	0,0196 rad / 1,123°

5.5 Análisis de los resultados del cálculo estructural

Viendo los resultados obtenidos mediante el programa ALCE se puede concluir que el diseño de la estructura soporta sin problemas las cargas a las que se ve sometida.

Uno de los hándicaps del programa es la imposibilidad de poder diseñar una estructura utilizando varias calidades de acero distintas.

El diseño responde a una configuración en la que los montantes son de acero A-52(S355) y las diagonales en acero A-42(S275).

El ALCE no permite realizar esa configuración, y se observa que, considerando todos los perfiles de acero de la calidad inferior, sólo 4 de las barras (131-134), en la combinación de hipótesis más desfavorable, superan los valores de tensión establecidos como límite para la validación del diseño. Estas 4 barras corresponden a un mismo montante del tramo 3ª.

Concretamente superan el límite para la hipótesis 13, correspondiente a viento posterior, es decir, el que incide directamente sobre ese montante que está por tanto trabajando a tracción.

Repitiendo los cálculos para acero S355, se comprueba que todas las barras están dentro de los límites establecidos.

En cualquier caso, se podría adoptar la medida de cambiar el perfil de esos montantes.

Si se sustituyen los angulares L150x150x16 por montantes de L150x150x18, es probable que se supere esa dificultad sin excesivo perjuicio del diseño.

El único parámetro afectado sería el peso propio de la estructura, que en cuanto a cálculo estructural no sería muy determinante (+4,2 Kg/m, es decir +60,3 Kg totales). Sí podría afectar sin embargo al aprovechamiento de materiales, pero siempre siendo un gasto que queda absorbido por el resto de modificaciones y por tanto sin alterar la naturaleza del proyecto.

Por tanto, se puede afirmar que ninguno de los perfiles de la estructura sobrepasa los valores de cálculo.

Las solicitaciones han sido mayoradas de acuerdo con lo establecido por la norma.

Se observa también que las uniones atornilladas trabajan con coeficientes de seguridad suficientemente amplios para asegurar el perfecto ensamblaje de la estructura.

Los giros y desplazamientos obtenidos están dentro de lo establecido por las especificaciones establecidas para este tipo de construcciones.

En la siguiente tabla se presentan las configuraciones y pesos de los tramos estándar de la familia de mástiles ACME.

ACME	1ª	2ª	3ª	1	2	3	4	5	6	emp	final
mont	150x18	150x18	150x16	150x18	150x16	150x14	120x12	120x12	100x10	100x10	90x8
Diag	90x9	90x9	90x8	80x8	80x8	70x7	70x7	60x6	60x6	60x6	50x5
PESO	1521,62	1312,27	1236,97	904,85	841,85	706,47	556,47	494,73	395,73	517,68	318,82

Tabla 14. Peso de cada tramo de los mástiles tipo ACME.

En esta tabla se comparan los pesos de los fustes de la familia ACME con sus equivalentes de Telefónica, indicando la variación de peso entre ellos.

	ACME15	ACME20	ACME25	ACME30				ACME35	ACME40
1A								1521,62	1521,62
2A								1312,27	1312,27
3A								1236,97	1236,97
1	904,85	904,85	904,85	904,85					
2		841,85	841,85	841,85					841,85
3			706,47	706,47				706,47	706,47
4				556,47				556,47	556,47
5									
6									
EMP	517,68	517,68	517,68	517,68				517,68	517,68
FIN	318,82	318,82	318,82	318,82				318,82	318,82
TOTAL	1741,35	2583,19	3289,66	3846,13				6170,31	7012,16
TME	3344,00	4972,00	6280,00	7592,00				9920,00	11516,00
VAR(%)	47,93	48,05	47,62	49,34				37,80	39,11

Tabla 15. Comparativa de pesos entre tramos y torres tipo ACME y Telefónica (M4A – CEL/CUA – EX)

Como se puede observar, la reducción de peso es notable, llegando en algunos casos hasta casi el 50%.

Esta reducción de peso implica una reducción de coste de material, que sumado a la menor mano de obra, abarata el producto final considerablemente.

5.6 Cálculo y dimensionamiento de la cimentación

La cimentación se ha calculado por el método del Sulzberger o método Suizo.

5.6.1 Método suizo:

Este método fue establecido por la Comisión para la revisión de prescripciones federales concernientes a las instalaciones de alta tensión como consecuencia de los ensayos efectuados en Gosgen y publicados en el boletín de la asociación Suiza de Electricidad.

Esta serie de pruebas evidencian que:

1. La posición del eje de rotación del macizo varía según el terreno y según el valor del esfuerzo aplicado en el soporte.
 - Se encuentra sensiblemente en el centro geométrico del macizo para los terrenos sin cohesión.
 - Se encuentra en d , situados a dos tercios de profundidad y a un cuarto de la anchura del macizo para terrenos plásticos.
 - Se encuentra en c para terrenos extremadamente resistentes.
2. La resistencia específica del terreno a compresión a lo largo de las paredes verticales varía en razón directa de la profundidad del macizo.
3. Esta resistencia depende de la naturaleza del terreno y de su estado de humedad.
4. Esta resistencia debajo del macizo tiene un valor por lo menos igual a la resistencia sobre las paredes verticales a la misma profundidad.

Partiendo de estos resultados, M. Sulzberger de la Comisión Suiza admite que:

- Una excavación puede girar un ángulo α tal que $\tan \alpha = 0,01$ sin que sea necesario tener en cuenta la variación del coeficiente característico del terreno.
- El terreno se comporta como un cuerpo más o menos elástico y plástico, en el cual los desplazamientos de la excavación y las reacciones son sensiblemente proporcionales.
- La resistencia del terreno es nula en la superficie del suelo y crece proporcionalmente a la profundidad bajo el mismo.
- Las fuerzas de rozamiento no se tienen en consideración.

Sobre estas bases, la Comisión Suiza establece las ecuaciones que se aplican a los soportes que cumplen:

$$\frac{h}{t} > 5$$

Sometidos a un esfuerzo paralelo a un eje de simetría y emplazados en terrenos medios y plásticos.

Macizos de sección rectangular:

Si M representa el momento en cm/Kg , en referencia al centro de rotación O , del esfuerzo F expresado en Kg ; a , b , t las cotas del macizo en centímetros, P el peso del macizo en kilogramos, C_t el coeficiente del terreno (es decir, el esfuerzo necesario para hundir una placa de 1 cm^2 la profundidad de 1 cm) de las paredes laterales a la profundidad t , C_b el coeficiente del terreno en el fondo; α el ángulo que gira la excavación por el efecto de F , s la presión máxima sobre el terreno en Kg/cm^2 :

$$M_v = \frac{b \cdot t^3}{36} \cdot C_t \cdot \tan \alpha + P \cdot a \cdot \left[0,5 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{P}{2 \cdot a^2 \cdot b \cdot C_b \cdot \tan \alpha}} \right]$$

$$\sigma_3 = C_t \cdot \frac{t}{3} \cdot \tan \alpha$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_3}{3}$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot C_b \cdot P \cdot \tan \alpha}{b}}$$

De la primera ecuación, el primer término del segundo miembro representa el momento de la acción lateral del terreno, M_1 , y el segundo término representa el momento de las cargas verticales, sea M_2 .

Cuando $\frac{M_1}{M_2} < 1$, es decir, cuando la acción del terreno es mayor que la acción de las cargas verticales, es bueno introducir un coeficiente de seguridad K y describir:

$$M = \frac{M_1 + M_2}{K}$$

En primera aproximación, admitiendo $\text{tg } \alpha = 0,01$, se puede adoptar:

$$M_2 = 0,4 P \cdot a$$

Refiriendo todo a un macizo de anchura unidad se tiene:

$$m_2 = 0,4 P \cdot \frac{a}{b}$$

$$m_1 = \frac{C_t \cdot t^3}{36} \cdot 0,01$$

y la relación

$$M \leq M_1 + M_2$$

Deviene en

$$m \leq m_1 + m_2$$

Cuando $\frac{m_1}{m_2} < 1$, se cumple:

$$m \leq \frac{m_1 + m_2}{K}$$

El coeficiente K está comprendido entre 1 y 1,5, adoptándose el valor 1,2 cuando $\frac{M_1}{M_2} = 0,4$.

En referencia al macizo de anchura unidad se puede trazar una gráfica para cálculos rápidos.

En el eje de abscisas los valores de C_t y en ordenadas las profundidades del suelo.

Se traza:

1. Un conjunto de rectas verticales por cada valor de C_t
2. Un conjunto de oblicuas partiendo del centro O, correspondiente al nivel del suelo y según los valores de C_t en función de la profundidad.
3. Una serie de curvas m_1 de momento de la acción del terreno por centímetro de anchura del macizo.

5.6.2 Forma de proceder:

Se calcula el esfuerzo F en punta de la torre.

Se conoce el peso de la propia torre.

Se estiman las dimensiones del macizo de hormigón, con ello su peso (peso específico del hormigón = 2.200 Kg/m³)

Se calculan los momentos resistente y de vuelco, a partir de las ecuaciones del método suizo.

Por iteración, se obtienen las dimensiones del macizo.

La condición de iteración es $\text{tg } \alpha = 0,01$.

Se considera un macizo de sección cuadrada, donde $a=b$.

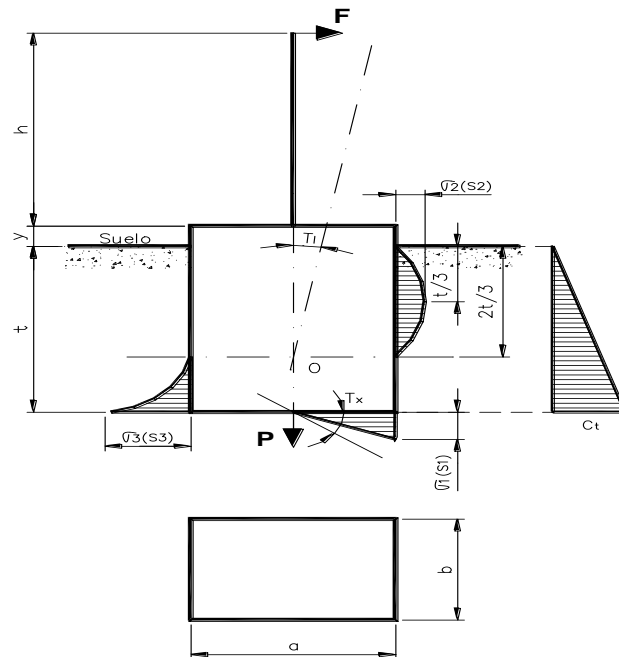


Figura 12. Método Suizo

5.6.3 Cálculos:

Momento Resistente:

$$M_r = M_{lateral} + M_{vertical} = \frac{b \cdot t^3}{36} C_t \cdot \text{tg } \alpha + P \cdot a \cdot \left[0,5 - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{P}{2 \cdot a^2 \cdot b \cdot C_b \cdot \text{tg } \alpha}} \right]$$

Momento de vuelco:

$$M_v = F \cdot \left[h + \frac{2}{3} \cdot t \right]$$

Donde:

M_r = Momento resistente:

$a = b$ = lado del macizo

t = altura del macizo.

P = peso total del conjunto

$C_t = C_b = C$ = Coeficiente del terreno

$\text{tg } \alpha$ =ángulo que puede girar el macizo

Dadas las dimensiones de la torre en su base, el macizo mínimo que se puede utilizar tiene dimensiones 4x4x3 m³.

Hay que comprobar si con estas dimensiones se cumplen las condiciones de momento resistente.

Teniendo en cuenta las expresiones anteriores en la siguiente tabla se presentan los resultados de la dimensión de la cimentación:

Terreno	Cimentación			Peso total			Volumen	Momento	Tensión en fondo	Tensión en lateral Sup.	Tensión en lateral Inf.	Segur
C kg/cm ³	largo m	ancho m	prof m	macizo kg	fuste kg	total kg	Cimentación m ³	Resistente kg m	σ_1 kg/cm ²	σ_2 kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²	K
6,00	4	4	3	105.600	9.770	115.370	48	373.032	5,88	2,00	6	3,55
8,00	4	4	3	105.600	9.770	115.370	48	438.084	6,79	2,67	8	4,17
10,00	4	4	3	105.600	9.770	115.370	48	501.531	7,60	3,33	10	4,77
12,00	4	4	3	105.600	9.770	115.370	48	564.076	8,32	4,00	12	5,37
14,00	4	4	3	105.600	9.770	115.370	48	626.054	8,99	4,67	14	5,96
16,00	4	4	3	105.600	9.770	115.370	48	687.648	9,61	5,33	16	6,55

Tabla 16. Valores obtenidos para la cimentación de mástiles tipo ACME

Para el cálculo anterior se han considerado los siguientes datos:

- Peso del mástil: 9.770 kg.
- Fuerza en punta: 2.501 kg
- Altura: 40 m.
- Peso específico del hormigón: 2.200 kg/m³.
- Altura peana sobre suelo: 0,15 m.
- Momento de vuelco: 105.042 kg .m

5.7 Presupuesto

Este presupuesto ha sido elaborado teniendo en cuenta los precios de mercado del período 2008 – 2009.

Para los materiales de los cuáles no existen datos se han estimado con perfiles o pletinas similares.

Las transformaciones de los perfiles y pletinas se han estimado para la fabricación a mano, sin utilización de máquinas transfer.

No se incluyen aquí los costes de transporte y montaje.

Este presupuesto puede estar sujeto a variaciones.

No está incluido el I.V.A ni gastos generales, ni margen de beneficio.

Perfiles estructurales

tipo	calidad	b. de 6m	b. de 12m	m	Kg/m	€/Kg		€
L180x18	S-355		2	24	48,6	0,91		1061,42
L150x18	S-355		3	36	40,1	0,895		1292,02
L150x16	S-355	6		36	35,9	0,747		965,423
L150x14	S-355		2	24	31,6	0,75		568,8
L120x12	S-355	3		18	21,6	0,75		291,6
L100x10	S-355	3		18	15	0,567		153,09
L90x8	S-355		2	24	10,9	0,543		142,049
L90x9	S-275	17		102	12,2	0,567		705,575
L90x8	S-275	10		60	10,9	0,608		397,632
L80x8	S-275	6		36	9,63	0,96		332,813
L70x7	S-275	12		72	7,38	0,778		413,398
L60x6	S-275	9		54	5,42	0,602		176,193
L50x5	S-275	8		48	3,77	0,673		121,786
							total	6621,8

Chapas de unión

espesor	calidad	corte		m	Kg/m	€/Kg		€
8	S-355	300x150		6	9,42	0,916		51,7723
10	S-355	300x150		6	11,77	0,751		53,0356
10	S-355	200x200		6	15,7	0,859		80,9178
14	S-355	300x150		6	16,48	0,767		75,841
18	S-355	150x150		12	21,19	0,86		218,681
18	S-355	200x200		6	28,26	0,86		145,822
							total	626,069

Mano de obra

	OPERACIÓN	€/h	h		€
	CORTE Y PUNZONADO	13,8	40		552
	CORTE Y SOLDADURA				
	MONT.	13,8	40		552
	PLEGADO	13,8	12		165,6
total					1104

Recuperación por chatarra

Peso materiales	Peso torre	Chatarra		€/Kg		€
9072,11	8765	307,11		0,07		21,4977
total						

Galvanizado en caliente

Peso torre	Ganancia	Total	€/Kg		€
8765	262,95	9027,95	0,39		3520,9
total					3520,9

TOTAL(€)	11851,28
-----------------	----------

€/KG	1,35
-------------	------

Se ha considerado que en el proceso de galvanizado, la estructura gana un 3% de peso.

CAPÍTULO 6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

6.1 Resumen y conclusiones

En este proyecto fin de carrera se ha afrontado la optimización del diseño de una torre de celosía portadora de antenas. Para ello se ha partido de un modelo ampliamente extendido como es el mástil M4A – CEL/CUA – (ss) de Telefónica.

El aspecto fundamental que se ha abordado como base de la optimización es el peso de la estructura, que es al fin y al cabo lo que marca el coste de la misma.

Se comienza presentando el modelo que sirve como punto de partida a fin de poder establecer una comparación.

Tras explicar las condiciones que deben cumplir los mástiles de estas características se proponen una serie de modificaciones para lograr el objetivo y se demuestra que, mediante los cálculos necesarios y utilizando la herramienta informática ALCE, las medidas adoptadas satisfacen los requisitos impuestos.

Las modificaciones propuestas son las siguientes:

- *Sección de la torre triangular.* De manera que al pasar de 4 caras a 3, la reducción de peso es apreciable.
- *Disposición de los montantes.* La peculiar orientación de los montantes permite una menor utilización de cartelas para coser con las diagonales, de manera que es más sencilla y liviana que otras configuraciones de sección triangular.
- *Diseño de los montantes.* Todos los montantes se han diseñado con 5 metros de longitud. Esto permite uniformizar el corte a medida de las barras, cuyo largo comercial es de 6 ó 12 metros.

La distribución de taladros también facilita la fabricación, ya sea manual o por control numérico.

Se ha adoptado la medida de poner los taladros al mismo gramil y unificar la distancia entre taladros, siempre cumpliendo la norma NBE – AE – 95.

De esta manera, con una única plantilla se pueden fabricar todos los montantes de la torre en el caso de la manufactura, o simplemente variando el tipo de perfil en el programa de control numérico, lo que permite un considerable ahorro de tiempo.

Esto es posible también por la orientación de los montantes, pues siempre es el mismo ala el que recibe las diagonales, y siempre el mismo el que requiere el uso de las cartelas.

- *Elección de los perfiles:* A la facilidad de encontrarlos en el mercado en las calidades requeridas hay que añadir que la disminución de espesores entre tramos de 2 en 2 milímetros permite cumplir las especificaciones sin necesidad de utilizar forros.

El diseño de los cubrejuntas y cupones no sólo cumple la norma, sino que permite un ahorro de material considerable al utilizar las puntas sobrantes de los montantes para su fabricación, sea partiendo de barras de 6 metros, como de las de 12 metros.

Para la colocación de las diagonales tampoco hacen falta forros, pues usando cartelas atornilladas a los montantes, por la parte exterior del ala, y del espesor correspondiente, se alinean con los montantes inmediatamente inferiores, y pueden montar perfectamente con el montante contiguo.

La distribución de las barras horizontales además de dotar de mayor rigidez a la estructura, permite la colocación de plataformas de trabajo y descanso allí donde sea requerido y siempre cada menos de 9 metros.

Se ha demostrado que la estructura soporta sin problemas las solicitudes a las que es sometida.

Se puede concluir, por tanto, que se ha llegado a una optimización del diseño de torre de celosía de sección cuadrada.

Sí es cierto que el macizo de hormigón es ligeramente mayor que en el caso de las torres de Telefónica, lo que implica un aumento de coste en la obra civil, pero por falta de datos no se puede estimar si este aumento puede quedar absorbido por el ahorro en otros conceptos.

Por último, si consideramos el coste por €/Kg de la estructura ACME 40 y lo aplicamos a la torre tipo de telefónica, se aprecia un ahorro de 6045 €, lo que supone una cifra considerable.

Y hay que tener en cuenta que este precio se obtiene considerando la fabricación manual.

Sería interesante continuar afinando el diseño de la familia de torres, quizás retocando perfiles, o rediseñando la distribución de diagonales.

Tal vez, estrechando la base, para evitar ese aumento en el macizo de hormigón.

Por otro lado, las uniones de las diagonales en las cruces no se ha diseñado, pues este proceso, al igual que sucede con cualquier diseño novedoso en este tipo de estructuras, se concreta en el momento de la fabricación del prototipo.

En cualquier caso, se abre con este estudio una vía de investigación orientada a este tipo de estructuras capaz de hacer más competitivo el mercado y dinamizarlo.

Sería interesante que se haga el esfuerzo de terminar por diseñar toda la familia de torres para cubrir el abanico de posibilidades que ofrece este campo de aplicación.

También sería importante comprobar si esta configuración o, partiendo de ella, se puede adaptar a la norma americana (TIA) de manera que sea viable su exportación, tanto en lo funcional como en lo económico, pues es el americano un mercado en plena expansión.

Corresponde a otras personas tomar la decisión sobre si hacerlo y cómo.

CAPÍTULO 7

ANEXOS

7.1 Características de las antenas

Seguidamente se presentan las características mecánicas de las antenas, cuyas dimensiones y cargas se han tomado para las diferentes hipótesis de cálculo:

a) Antenas omnidireccionales (ASPJ-977):

Longitud.....	4,38 m
Peso.....	16 kg
Fuerza de empuje (150 km/h)	10,18 kg
Momento flector	58 kg m

b) Antenas sectoriales TMA (DBD90060,150):

Dimensiones (altoxanchoxprofundo)	1.880x320x68 mm
Peso.....	9,5 kg
Fuerza de empuje (150 km/h)	97 kg

c) Antenas sectoriales GSM-900 (DBD90060,165):

Dimensiones (altoxanchoxprofundo)	2.440x310x66 mm
Peso.....	13 kg
Fuerza de empuje (150 km/h)	134 kg

d) Antenas sectoriales GSM-1800 :

Dimensiones (altoxanchoxprofundo)	1.400x172x72 mm
Peso.....	6 kg
Fuerza de empuje (150 km/h)	25 kg

e) Antenas sectoriales de doble polaridad (90090DD,130) :

Dimensiones (altoxanchoxprofundo)	2.440x310x130 mm
Peso.....	18 kg
Fuerza de empuje (150 km/h) frontal	127 kg

Se tomará como coeficiente eólico mínimo el valor de 1,45 en todas las antenas cuya carga al viento no sea facilitada por el suministrador.

f) Parábola:

Diámetro	1,2 m
Peso.....	75 kg
Fuerza de empuje (150 Km/h) frontal	191 kg
Fuerza de empuje (150 Km/h) 45°	201 kg

Diámetro	0,6 m
Peso.....	25 kg
Fuerza de empuje (150 Km/h) frontal	47,8 kg
Fuerza de empuje (150 Km/h) 45°	50,3 kg

Diámetro	0,3 m
Peso.....	15 kg
Fuerza de empuje (150 Km/h) frontal	12 kg
Fuerza de empuje (150 Km/h) 45°	12,6 kg

7.2 Características de las máquinas transfer.

En la siguiente tabla resumen se especifican los gramiles mínimos que se pueden aplicar en estas máquinas en función del tipo de perfil.

ACME	1ª	2A	3A	1	2	3	4	5	6	emp	fin
mont	150x18	150x18	150x16	150x18	150x16	150x14	120x12	120x12	100x10	100x10	90x8
gramil	40	40	38	40	38	36	34	34	29	29	27
diag	90x9	90x9	90x8	80x8	80x8	70x7	70x7	60x6	60x6	60x6	50x5
gramil	28	28	27	27	27	21	21	20	20	20	16

Tabla 17. Gramiles mínimos aplicables a los perfiles constructivos.

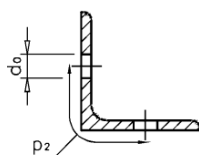
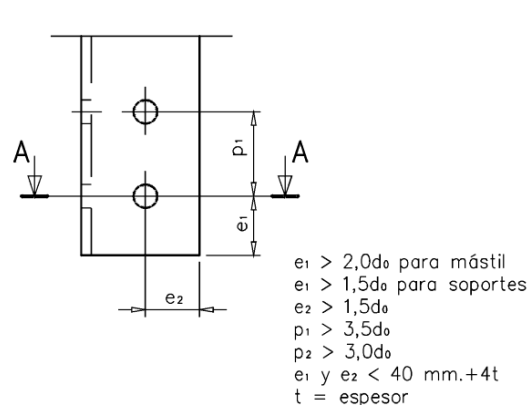
Esta tabla certifica que se pueden aplicar las medidas adoptadas para la estandarización de la fabricación.

Todos los gramiles aplicados son superiores al mínimo que permiten los utillajes de las máquinas transfer que se emplearían, y por tanto válidos para la fabricación.

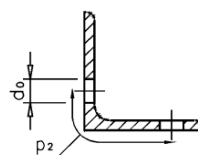
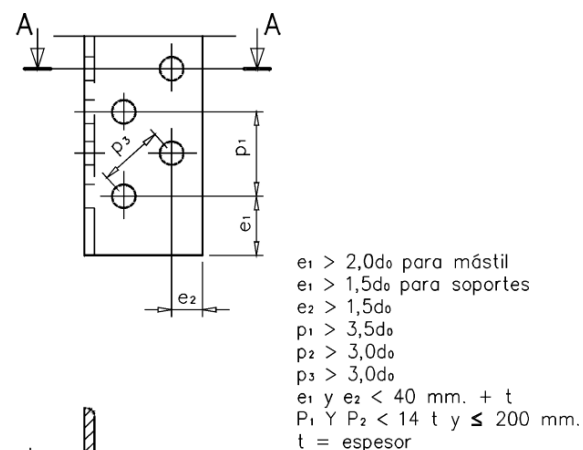
En cuanto a la fabricación manual, los límites impuestos por las punzonadoras tampoco interfieren. En cualquier caso, siempre queda la opción del taladro de columna.

7.3 Planos aclaratorios.

Diseño de los cubrejuntas y cupones.



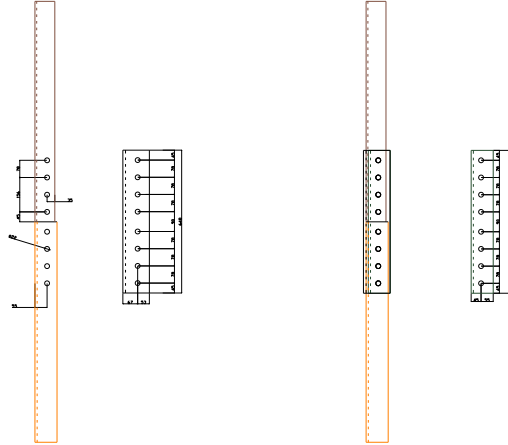
SECCIÓN A-A



SECCIÓN A-A

Figura 13. Distribución de uniones atornilladas según norma NBE – EA – 95.

Tramos Empalme – Final:



Montantes L90x8:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 72 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 72 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Montantes L100x10:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 72 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 45 \begin{cases} 45 > 33 = 1,5d_0 \\ 45 < 80 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 110 \{ 110 > 66 = 3d_0$$

Cubrejuntas L120x12:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 53 \begin{cases} 53 > 33 = 1,5d_0 \\ 53 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 134 \{ 134 > 66 = 3d_0$$

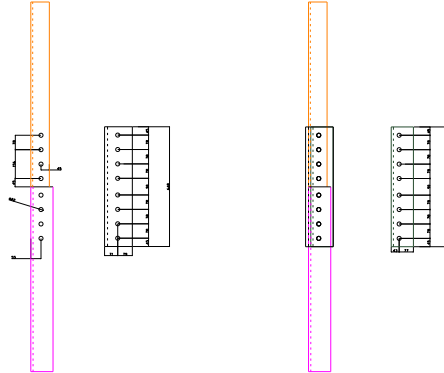
Cupones L100x10

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 80 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 55 \begin{cases} 55 > 33 = 1,5d_0 \\ 55 < 80 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Tramos 4 – empalme:

Montantes L100x10:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 72 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 45 \begin{cases} 45 > 33 = 1,5d_0 \\ 45 < 80 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 110 \{ 110 > 66 = 3d_0$$

Montantes L120x12:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 65 \begin{cases} 65 > 33 = 1,5d_0 \\ 65 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 110 \{ 110 > 66 = 3d_0$$

Cubrejuntas L150x16:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 104 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 53 \begin{cases} 79 > 33 = 1,5d_0 \\ 79 < 104 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 142 \{ 142 > 66 = 3d_0$$

Cupones L120x12:

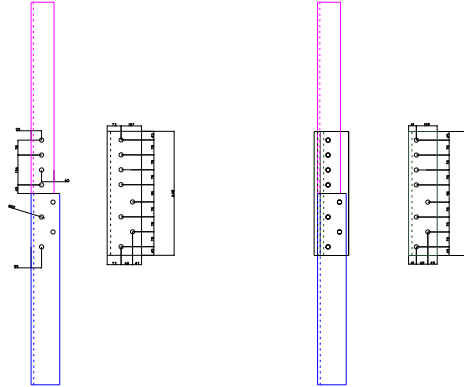
$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 77 \begin{cases} 77 > 33 = 1,5d_0 \\ 77 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 86 \{ 86 > 66 = 3d_0$$

Tramos 3 – 4:



Montantes L120x12:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 65 \begin{cases} 65 > 33 = 1,5d_0 \\ 65 < 88 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 110 \{ 110 > 66 = 3d_0$$

Montantes L150x14:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Cubrejuntas L180x18:

Tramo superior:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 112 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 107 \begin{cases} 107 > 33 = 1,5d_0 \\ 107 < 112 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 146 \{ 146 > 66 = 3d_0$$

Tramo inferior:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 47 \begin{cases} 47 > 33 = 1,5d_0 \\ 47 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 120 \{ 120 > 66 = 3d_0$$

Cupones L150x18:

Tramo superior:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 112 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$e_2 = 109 \begin{cases} 109 > 33 = 1,5d_0 \\ 109 < 112 = 40 + 4t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 82 \{ 82 > 66 = 3d_0$$

Tramo inferior:

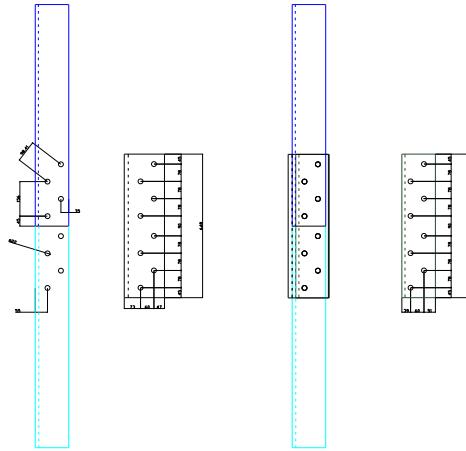
$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 49 \begin{cases} 49 > 33 = 1,5d_0 \\ 49 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Tramos 2 – 3:



Montantes L150x14:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Montantes L150x16:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 56 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 56 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Cubrejuntas L180x18:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 47 \begin{cases} 47 > 33 = 1,5d_0 \\ 47 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 120 \{ 120 > 66 = 3d_0$$

Cupones L150x14

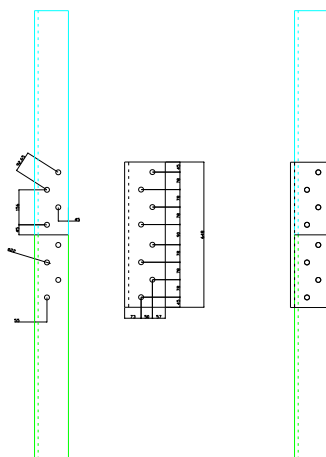
$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 51 \begin{cases} 51 > 33 = 1,5d_0 \\ 51 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Tramos A3 – 2:



Montantes L150x16:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 56 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 56 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Cubrejuntas L180x18:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 47 \begin{cases} 47 > 33 = 1,5d_0 \\ 47 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 78 \{ 78 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 120 \{ 120 > 66 = 3d_0$$

Cupones L150x14

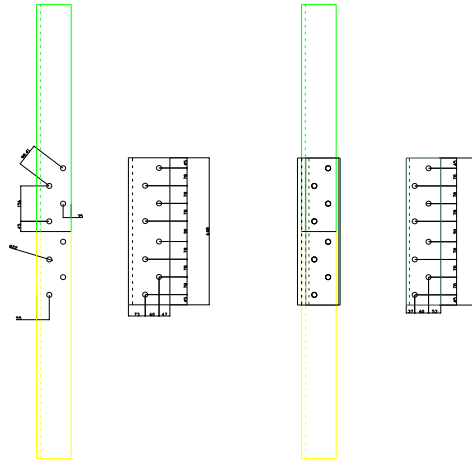
$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 51 \begin{cases} 51 > 33 = 1,5d_0 \\ 51 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Tramos A2 – A3:



Montantes L150x16:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 56 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 56 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Montantes L150x18:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 35 \begin{cases} 35 > 33 = 1,5d_0 \\ 35 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

Cubrejuntas L180x18:

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 47 \begin{cases} 47 > 33 = 1,5d_0 \\ 47 < 58 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 120 \{ 120 > 66 = 3d_0$$

Cupones L150x14

$$e_1 = 45 \begin{cases} 45 > 44 = 2d_0 \\ 45 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$e_2 = 51 \begin{cases} 51 > 33 = 1,5d_0 \\ 51 < 54 = 40 + t \end{cases}$$

$$p_1 = 156 \{ 156 > 77 = 3,5d_0$$

$$p_2 = 90 \{ 90 > 66 = 3d_0$$

7.4 MÉTODO MATRICIAL. DESARROLLO TEÓRICO

Conceptos e hipótesis básicas:

- Comportamiento lineal de la estructura y materiales.
- Movimientos pequeños comparados con las dimensiones de la estructura.
- Se desprecian los fenómenos que afectan y varían la rigidez.
- Materiales homogéneos e isotrópicos.

Relaciones fundamentales:

1. Ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ \sum M &= 0\end{aligned}$$

2. Ecuaciones de compatibilidad:

Entre los elementos de la estructura y las condiciones de contorno.

3. Ley de comportamiento:

Que relaciona las tensiones con las deformaciones.

Ley de Hooke, ecuaciones de Lamé.

Definiciones:

- Rigidez: Fuerza o par que aparece ante un alargamiento o giro unitario.
- Flexibilidad: Alargamiento o giro producido por una fuerza o par unidad.

De esta forma se puede escribir:

$$\begin{aligned}F &= K \cdot u \\ u &= A \cdot F\end{aligned}$$

Y matricialmente:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}$$

$$[F] = [K] \cdot [\Delta]$$

Sistemas de referencia:

Sistema cartesiano que permite la definición geométrica de la estructura

- Sistema local: En cada barra o elemento se define un sistema local, que se refieren los movimientos y fuerzas de cada barra.

En el caso del programa ALCE este sistema local corresponde al eje X en la dirección del eje longitudinal de cada barra, y la disposición de los otros dos ejes forma un triedro orientado a derechas.

- Sistema global: Se define un sistema de coordenadas único, global que permite referir a él de forma única y para toda la estructura los movimientos y fuerzas de los nodos.

Características de la matriz de rigidez:

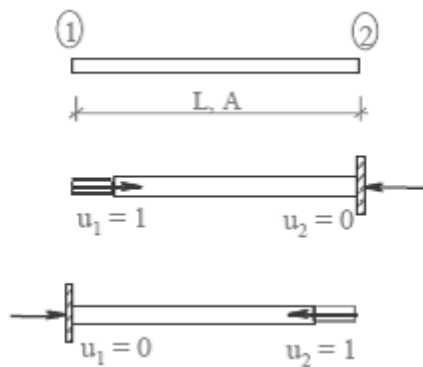
- Un elemento k_{ij} representa la fuerza que aparece en la coordenada i cuando se comunica un movimiento unidad en la coordenada j , manteniendo nulos todos los demás.
- La columna j se genera analizando las fuerzas que van apareciendo en todas las coordenadas al comunicar un movimiento unidad en la coordenada j , manteniendo nulos todos los demás.
- La fila i se genera analizando las fuerzas que aparecen en la coordenada i al comunicar un movimiento unidad, sucesivamente, a las n coordenadas manteniendo en cada caso nulos todos los demás.
- Los elementos de la diagonal principal no pueden ser negativos pues representan las fuerzas que aparecen en una coordenada al dar un movimiento unidad en la propia coordenada.

- La matriz de rigidez es simétrica debido al principio de reciprocidad ($k_{ij}=k_{ji}$)

Rigideces de barras elementales:

1. Barras de celosía en estructuras planas:

Ley de Hooke: $\Delta L = \frac{L \cdot F}{A \cdot E} \rightarrow F = \frac{A \cdot E}{L} \cdot \Delta L; \quad K = \frac{A \cdot E}{L}$



$$k_{11} = \frac{A \cdot E}{L} \quad k_{12} = -\frac{A \cdot E}{L}$$

$$k_{21} = -\frac{A \cdot E}{L} \quad k_{22} = \frac{A \cdot E}{L}$$

Generalizando para ambos nudos:

$$F_1 = k_{11} \cdot u_1 + k_{12} \cdot u_2$$

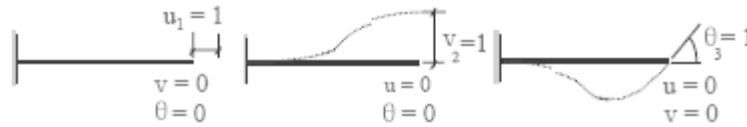
$$F_2 = k_{21} \cdot u_1 + k_{22} \cdot u_2$$

Y matricialmente:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & -\frac{E \cdot A}{L} \\ -\frac{E \cdot A}{L} & \frac{E \cdot A}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$[F] = [K] \cdot [\delta]$$

2. Barra en voladizo:



$$N = k_{11} = \frac{A \cdot E}{L} \quad N = k_{12} = 0 \quad N = k_{13} = 0$$

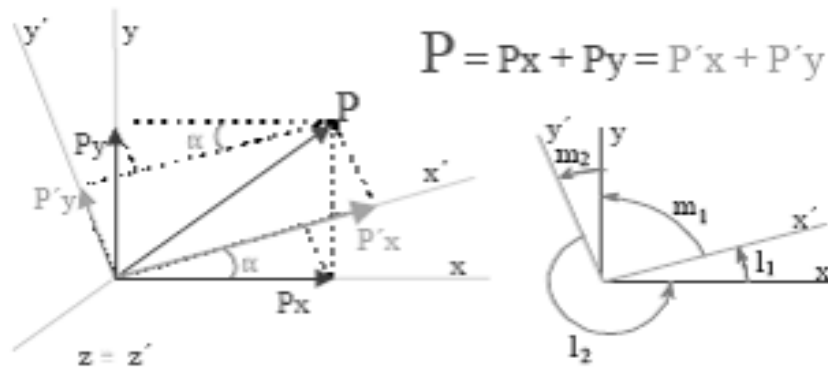
$$V = k_{21} = 0 \quad V = k_{22} = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad V = k_{23} = -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

$$M = k_{31} = 0 \quad M = k_{32} = -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad M = k_{33} = \frac{4 \cdot E \cdot I}{L}$$

Matricialmente:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A \cdot E}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}$$

Transformación de coordenadas:



$$P'_x = P_x \cdot \cos \alpha + P_y \cdot \sin \alpha$$

$$P'_y = -P_x \cdot \sin \alpha + P_y \cdot \cos \alpha$$

$$\begin{bmatrix} P'_x \\ P'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix}$$

Si designamos por u'_x , u'_y los vectores unitarios que definen la posición de los ejes $x' - y'$ respecto a los ejes $x - y$:

$$u'_x = i \cdot \cos \alpha + j \cdot \sin \alpha$$

$$u'_y = -i \cdot \sin \alpha + j \cdot \cos \alpha$$

Los cosenos directores l_1 , l_2 , m_1 , m_2 , por columnas, de los nuevos vectores respecto a los antiguos, serán:

$$l_1 = \cos(x'x) \qquad l_2 = \cos(y'x)$$

$$m_1 = \cos(x'y) \qquad m_2 = \cos(y'y)$$

$$u'_x = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ m_1 \end{bmatrix}$$

$$u'_y = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_2 \\ m_2 \end{bmatrix}$$

Siendo

$$\begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 \\ l_2 & m_2 \end{bmatrix} = L^T \quad \text{matriz de rotación}$$

$$\begin{bmatrix} l_1 & l_2 \\ m_1 & m_2 \end{bmatrix} = L \quad \text{matriz de transformación.}$$

Por lo tanto, se puede escribir para los vectores, así como para los movimientos:

$$P' = L^T \cdot P$$

$$\delta' = L^T \cdot \delta$$

Como $L^T = L^{-1}$ se puede escribir también:

$$P = L \cdot P'$$

$$\delta = L \cdot \delta'$$

Para el caso de un elemento tridimensional:

$$\begin{array}{lll} l_1 = \cos(x'x) & l_2 = \cos(y'x) & l_3 = \cos(z'x) \\ m_1 = \cos(x'y) & m_2 = \cos(y'y) & m_3 = \cos(z'y) \\ n_1 = \cos(x'z) & n_2 = \cos(y'z) & n_3 = \cos(z'z) \end{array}$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \quad L^T = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}$$

Y de esta manera:

$$\begin{aligned} [P] &= [L^T] \cdot [P] \\ [M] &= [L^T] \cdot [M] \\ [\delta] &= [L^T] \cdot [\delta] \\ [\theta] &= [L^T] \cdot [\theta] \end{aligned}$$

Para relacionar los valores en ejes globales y locales y haciendo uso de la matriz de rigidez se utiliza la expresión:

$$P = (L \cdot k' \cdot L^T) \cdot \delta$$

Siendo, por tanto:

$$K = (L \cdot k' \cdot L^T)$$

Lo que permite pasar cada matriz en coordenadas locales a matriz en coordenadas globales por operaciones con la matriz de transformación y su transpuesta.

Discretización de la estructura:

La manera de operar es descomponer la estructura en elementos-viga de manera que las matrices de cada elemento son iguales en coordenadas locales. Se tienen en cuenta las relaciones de las vigas en los nudos comunes y se ensambla la matriz de rigidez de la estructura.

Después se transforma a globales, obteniendo los esfuerzos y deformaciones en todas las barras en ejes globales.

En el método matricial se trabaja con los nudos.

Resumen del método. Sistematización práctica:

1. Analizar bien la estructura. Predimensionar. Fijar modo físico de trabajo (articulado, empotrado, torsión, plana o espacial...)
2. Ordenar nudos y barras, fijar coordenadas locales y globales.
3. Calcular cargas y reacciones en nudos extremos de cada barra. Pasar cargas a nudos y anotar para su utilización posterior las reacciones hiperestáticas.

Vector de cargas $\rightarrow P'_{nudos} = -P'_{hiperestáticas}$

4. Paso de locales a globales de los vectores de carga, previo cálculo de las matrices de transformación y su traspuesta de cada barra.

$$P_{nudos} = L \cdot P'_{nudos}$$

5. Paso de locales a globales de cada matriz de rigidez de las barras, previo cálculo en locales de las mismas.

$$k_{barras} = L \cdot k'_{barras} \cdot L^T$$

6. Ecuación matricial en globales.

$$[P] = [K] \cdot [\delta]$$

7. Separación de acciones con restricciones (filas y columnas)

-
8. Resolución del sistema, calculando los movimientos incógnita en globales.

$$[\delta] = [K^{-1}] \cdot [P]$$

Paso de los movimientos a locales $[\delta'] = [L^T] \cdot [\delta]$

9. Cálculo de los esfuerzos de cada barra en locales y comprobación de la solución estudiada

$$[P'] = [K'] \cdot [\delta'] + [P'_{hiperestáticas}]$$

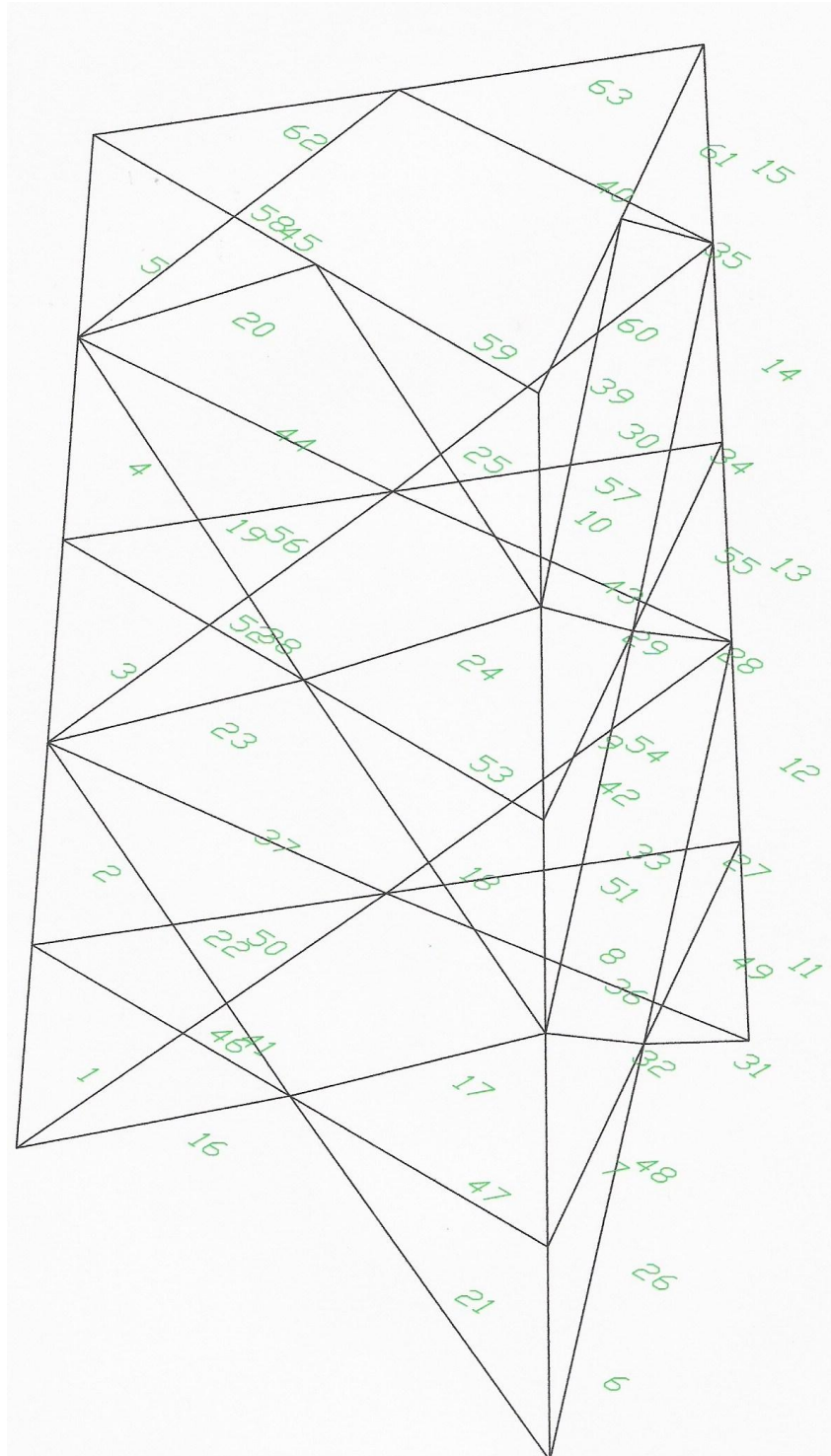
10. Cálculo de las reacciones, bien a través de los esfuerzos calculados en barras o bien en la forma:

$$[F_R] = [K_{RL}] \cdot [\delta_L]$$

Donde R=restricciones
L=grados de libertad

7.5 MODELO COMPUTACIONAL POR TRAMOS

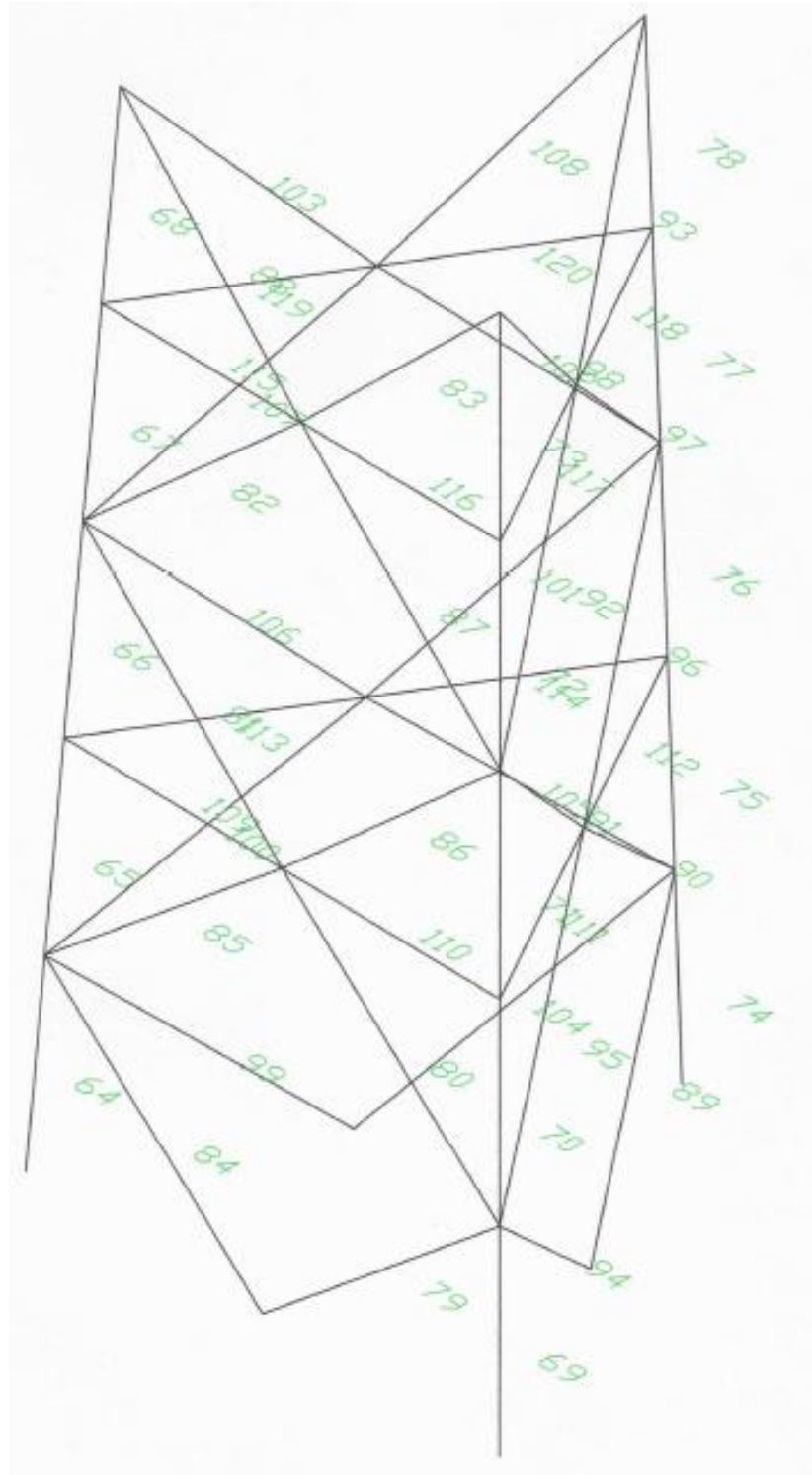
Tramo A1:



tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
1A	1	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	2	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	3	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	4	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	5	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	6	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	7	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	8	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	9	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	10	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	11	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	12	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	13	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	14	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	15	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
1A	16	90	9	1,80	0,16	0,27	12,20	21,96	13,61
1A	17	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	18	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	19	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	20	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	21	90	9	1,80	0,16	0,27	12,20	21,96	13,61
1A	22	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	23	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	24	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	25	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	26	90	9	1,80	0,16	0,27	12,20	21,96	13,61
1A	27	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	28	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	29	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	30	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	31	90	9	1,80	0,16	0,27	12,20	21,96	13,61
1A	32	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	33	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	34	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	35	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	36	90	9	1,80	0,16	0,27	12,20	21,96	13,61
1A	37	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	38	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	39	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	40	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	41	90	9	1,80	0,16	0,27	12,20	21,96	13,61
1A	42	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00

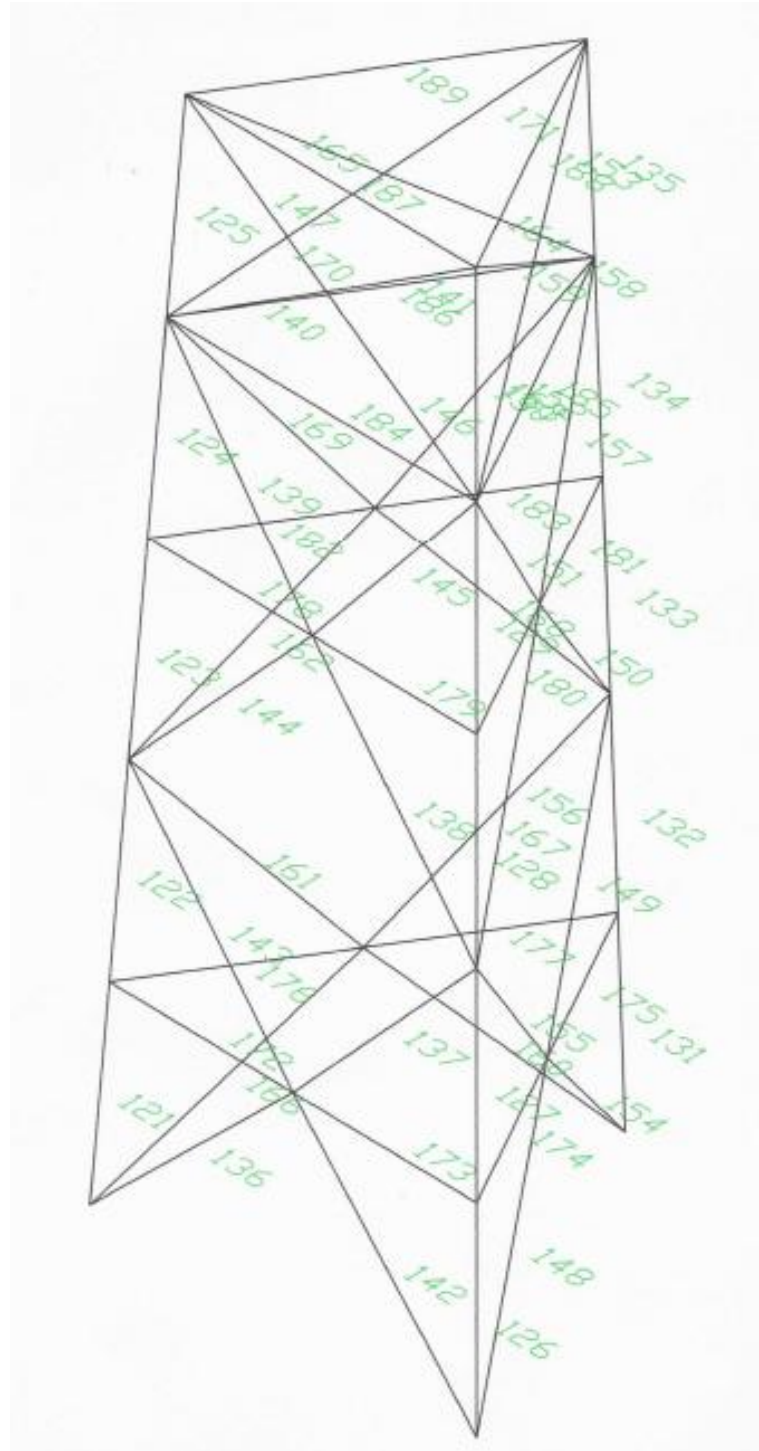
1A	43	90	9	1,72	0,15	0,26	12,20	20,98	13,00
1A	44	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	45	90	9	1,64	0,15	0,25	12,20	20,01	12,40
1A	46	90	9	1,45	0,13	0,22	12,20	17,69	10,96
1A	47	90	9	1,45	0,13	0,22	12,20	17,69	10,96
1A	48	90	9	1,45	0,13	0,22	12,20	17,69	10,96
1A	49	90	9	1,45	0,13	0,22	12,20	17,69	10,96
1A	50	90	9	1,45	0,13	0,22	12,20	17,69	10,96
1A	51	90	9	1,45	0,13	0,22	12,20	17,69	10,96
1A	52	90	9	1,35	0,12	0,20	12,20	16,47	10,21
1A	53	90	9	1,35	0,12	0,20	12,20	16,47	10,21
1A	54	90	9	1,35	0,12	0,20	12,20	16,47	10,21
1A	55	90	9	1,35	0,12	0,20	12,20	16,47	10,21
1A	56	90	9	1,35	0,12	0,20	12,20	16,47	10,21
1A	57	90	9	1,35	0,12	0,20	12,20	16,47	10,21
1A	58	90	9	1,25	0,11	0,19	12,20	15,25	9,45
1A	59	90	9	1,25	0,11	0,19	12,20	15,25	9,45
1A	60	90	9	1,25	0,11	0,19	12,20	15,25	9,45
1A	61	90	9	1,25	0,11	0,19	12,20	15,25	9,45
1A	62	90	9	1,25	0,11	0,19	12,20	15,25	9,45
1A	63	90	9	1,25	0,11	0,19	12,20	15,25	9,45
								1521,62	126,53

Tramo A2:



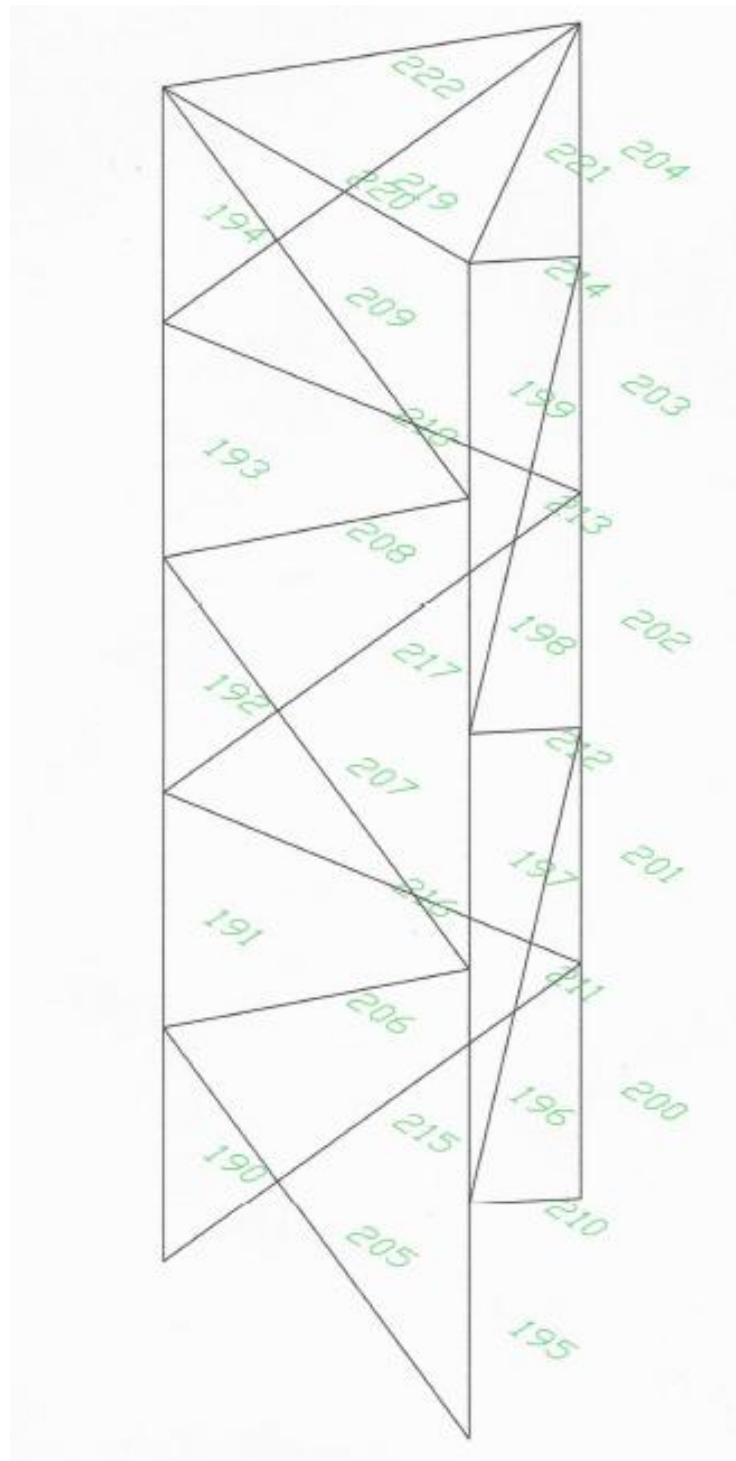
tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
2A	64	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	65	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	66	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	67	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	68	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	69	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	70	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	71	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	72	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	73	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	74	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	75	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	76	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	77	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	78	150	18	1,00	0,15	0,21	40,10	40,10	12,60
2A	79	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	80	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	81	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	82	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	83	90	9	1,41	0,13	0,21	12,20	17,20	10,66
2A	84	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	85	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	86	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	87	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	88	90	9	1,41	0,13	0,21	12,20	17,20	10,66
2A	89	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	90	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	91	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	92	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	93	90	9	1,41	0,13	0,21	12,20	17,20	10,66
2A	94	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	95	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	96	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	97	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	98	90	9	1,41	0,13	0,21	12,20	17,20	10,66
2A	99	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	100	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	101	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	102	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	103	90	9	1,41	0,13	0,21	12,20	17,20	10,66
2A	104	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	105	90	9	1,56	0,14	0,23	12,20	19,03	11,79
2A	106	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	107	90	9	1,49	0,13	0,22	12,20	18,18	11,26
2A	108	90	9	1,41	0,13	0,21	12,20	17,20	10,66
2A	109	90	9	1,15	0,10	0,17	12,20	14,03	8,69

2A	110	90	9	1,15	0,10	0,17	12,20	14,03	8,69
2A	111	90	9	1,15	0,10	0,17	12,20	14,03	8,69
2A	112	90	9	1,15	0,10	0,17	12,20	14,03	8,69
2A	113	90	9	1,15	0,10	0,17	12,20	14,03	8,69
2A	114	90	9	1,15	0,10	0,17	12,20	14,03	8,69
2A	115	90	9	1,05	0,09	0,16	12,20	12,81	7,94
2A	116	90	9	1,05	0,09	0,16	12,20	12,81	7,94
2A	117	90	9	1,05	0,09	0,16	12,20	12,81	7,94
2A	118	90	9	1,05	0,09	0,16	12,20	12,81	7,94
2A	119	90	9	1,05	0,09	0,16	12,20	12,81	7,94
2A	120	90	9	1,05	0,09	0,16	12,20	12,81	7,94
								1312,27	104,91

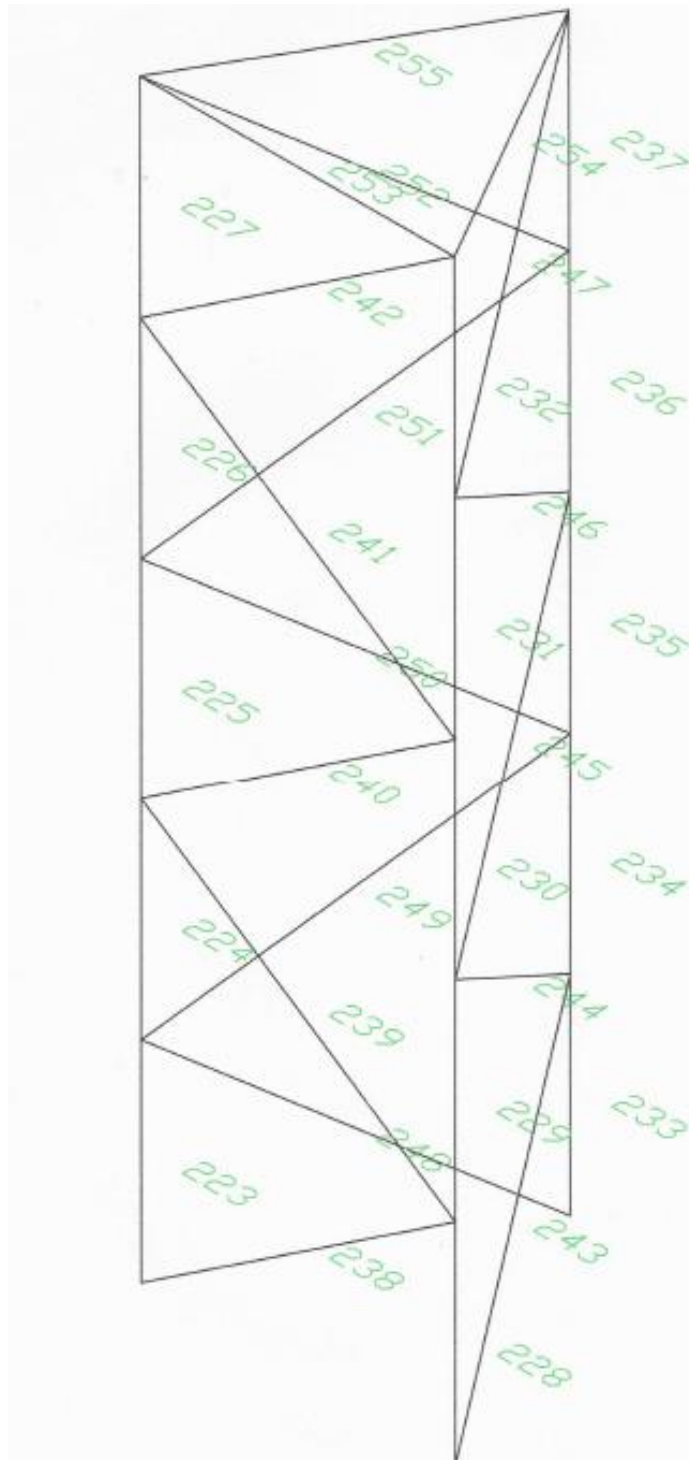
Tramo A3:

tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
3A	121	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	122	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	123	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	124	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	125	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	126	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	127	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	128	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	129	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	130	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	131	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	132	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	133	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	134	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	135	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
3A	136	90	8	1,41	0,13	0,21	10,90	15,37	10,66
3A	137	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	138	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	139	90	8	1,28	0,12	0,19	10,90	13,95	9,68
3A	140	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	141	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	142	90	8	1,41	0,13	0,21	10,90	15,37	10,66
3A	143	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	144	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	145	90	8	1,28	0,12	0,19	10,90	13,95	9,68
3A	146	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	147	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	148	90	8	1,41	0,13	0,21	10,90	15,37	10,66
3A	149	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	150	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	151	90	8	1,28	0,12	0,19	10,90	13,95	9,68
3A	152	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	153	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	154	90	8	1,41	0,13	0,21	10,90	15,37	10,66
3A	155	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	156	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	157	90	8	1,28	0,12	0,19	10,90	13,95	9,68
3A	158	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	159	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	160	90	8	1,41	0,13	0,21	10,90	15,37	10,66

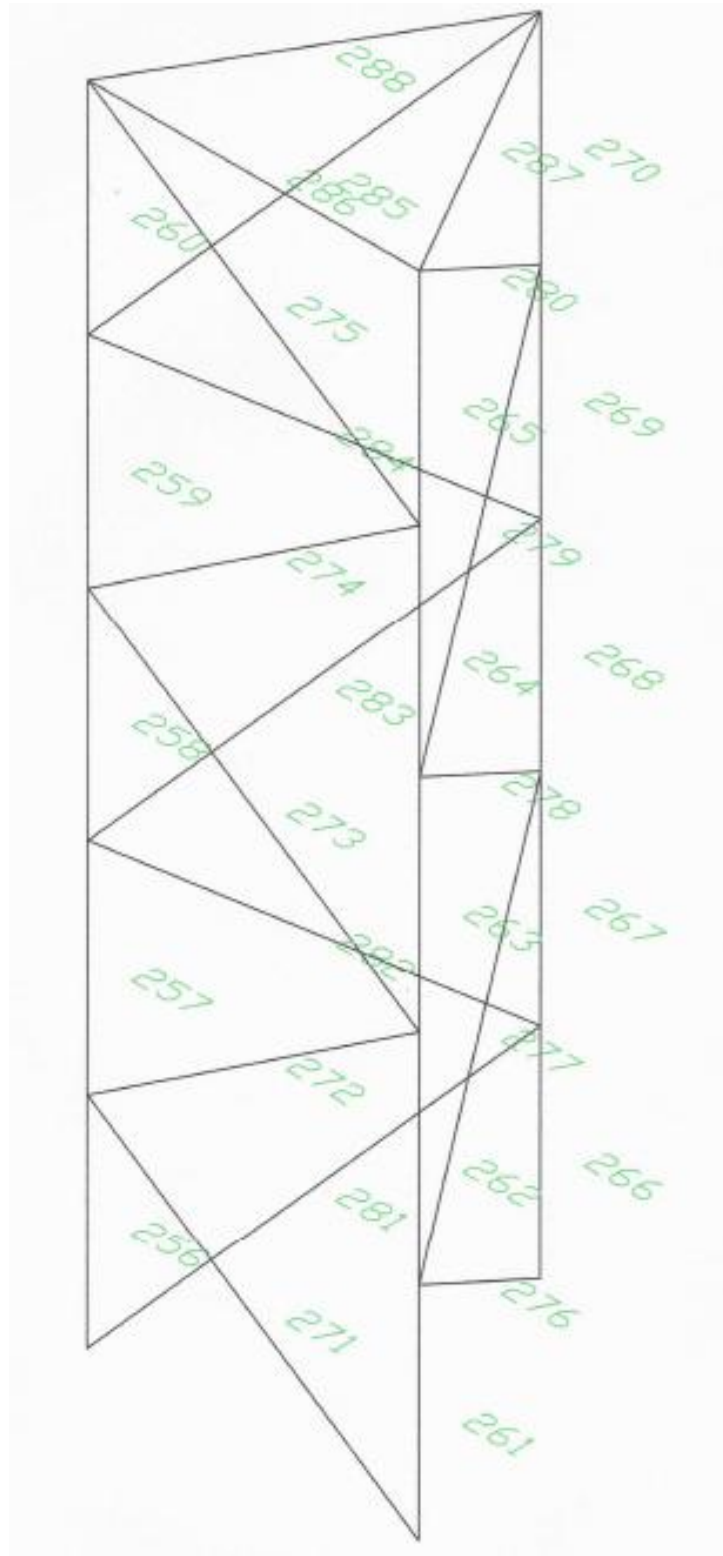
3A	161	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	162	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	163	90	8	1,28	0,12	0,19	10,90	13,95	9,68
3A	164	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	165	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	166	90	8	1,41	0,13	0,21	10,90	15,37	10,66
3A	167	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	168	90	8	1,35	0,12	0,20	10,90	14,72	10,21
3A	169	90	8	1,28	0,12	0,19	10,90	13,95	9,68
3A	170	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	171	90	8	0,97	0,09	0,15	10,90	10,57	7,33
3A	172	90	8	0,95	0,09	0,14	10,90	10,36	7,18
3A	173	90	8	0,95	0,09	0,14	10,90	10,36	7,18
3A	174	90	8	0,95	0,09	0,14	10,90	10,36	7,18
3A	175	90	8	0,95	0,09	0,14	10,90	10,36	7,18
3A	176	90	8	0,95	0,09	0,14	10,90	10,36	7,18
3A	177	90	8	0,95	0,09	0,14	10,90	10,36	7,18
3A	178	90	8	0,85	0,08	0,13	10,90	9,27	6,43
3A	179	90	8	0,85	0,08	0,13	10,90	9,27	6,43
3A	180	90	8	0,85	0,08	0,13	10,90	9,27	6,43
3A	181	90	8	0,85	0,08	0,13	10,90	9,27	6,43
3A	182	90	8	0,85	0,08	0,13	10,90	9,27	6,43
3A	183	90	8	0,85	0,08	0,13	10,90	9,27	6,43
3A	184	90	8	1,60	0,14	0,24	10,90	17,44	12,10
3A	185	90	8	1,60	0,14	0,24	10,90	17,44	12,10
3A	186	90	8	1,60	0,14	0,24	10,90	17,44	12,10
3A	187	90	8	1,50	0,14	0,23	10,90	16,35	11,34
3A	188	90	8	1,50	0,14	0,23	10,90	16,35	11,34
3A	189	90	8	1,50	0,14	0,23	10,90	16,35	11,34
								1236,97	112,24

Tramo 2:

tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
2	190	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	191	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	192	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	193	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	194	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	195	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	196	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	197	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	198	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	199	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	200	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	201	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	202	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	203	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	204	150	16	1,00	0,15	0,21	35,90	35,90	12,60
2	205	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	206	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	207	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	208	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	209	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	210	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	211	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	212	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	213	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	214	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	215	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	216	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	217	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	218	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	219	80	8	1,80	0,14	0,25	9,63	17,33	12,10
2	220	80	8	1,50	0,12	0,21	9,63	14,45	10,08
2	221	80	8	1,50	0,12	0,21	9,63	14,45	10,08
2	222	80	8	1,50	0,12	0,21	9,63	14,45	10,08
								841,85	66,78

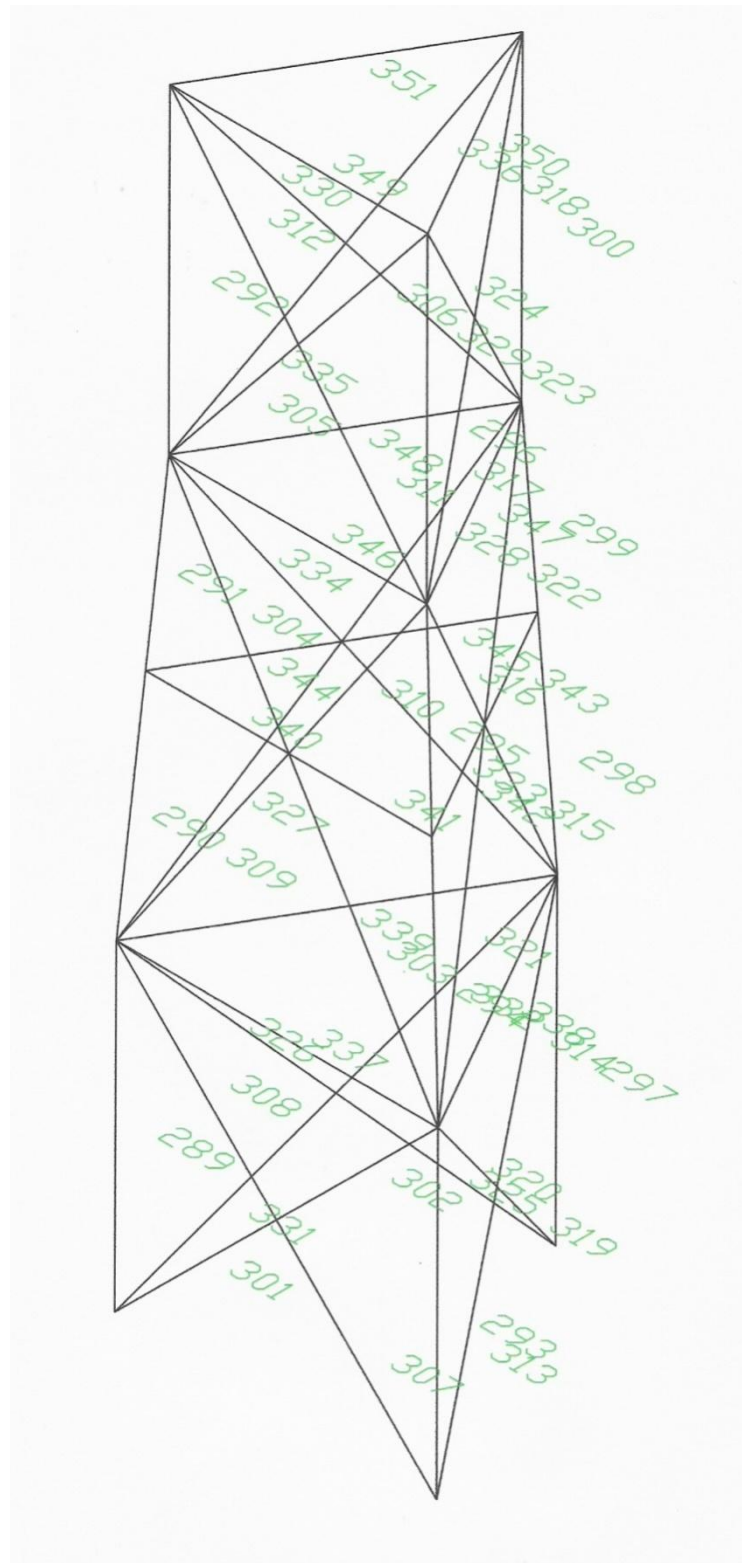
Tramo 3:

tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
3	223	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	224	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	225	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	226	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	227	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	228	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	229	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	230	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	231	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	232	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	233	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	234	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	235	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	236	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	237	150	14	1,00	0,15	0,21	31,60	31,60	12,60
3	238	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	239	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	240	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	241	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	242	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	243	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	244	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	245	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	246	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	247	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	248	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	249	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	250	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	251	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	252	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
3	253	70	7	1,50	0,11	0,20	7,38	11,07	8,82
3	254	70	7	1,50	0,11	0,20	7,38	11,07	8,82
3	255	70	7	1,50	0,11	0,20	7,38	11,07	8,82
								706,47	62,37

Tramo 4:

tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
4	256	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	257	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	258	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	259	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	260	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	261	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	262	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	263	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	264	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	265	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	266	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	267	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	268	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	269	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	270	120	12	1,00	0,12	0,18	21,60	21,60	10,08
4	271	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	272	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	273	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	274	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	275	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	276	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	277	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	278	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	279	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	280	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	281	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	282	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	283	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	284	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	285	70	7	1,80	0,13	0,23	7,38	13,28	10,58
4	286	70	7	1,50	0,11	0,20	7,38	11,07	8,82
4	287	70	7	1,50	0,11	0,20	7,38	11,07	8,82
4	288	70	7	1,50	0,11	0,20	7,38	11,07	8,82
								556,47	56,07

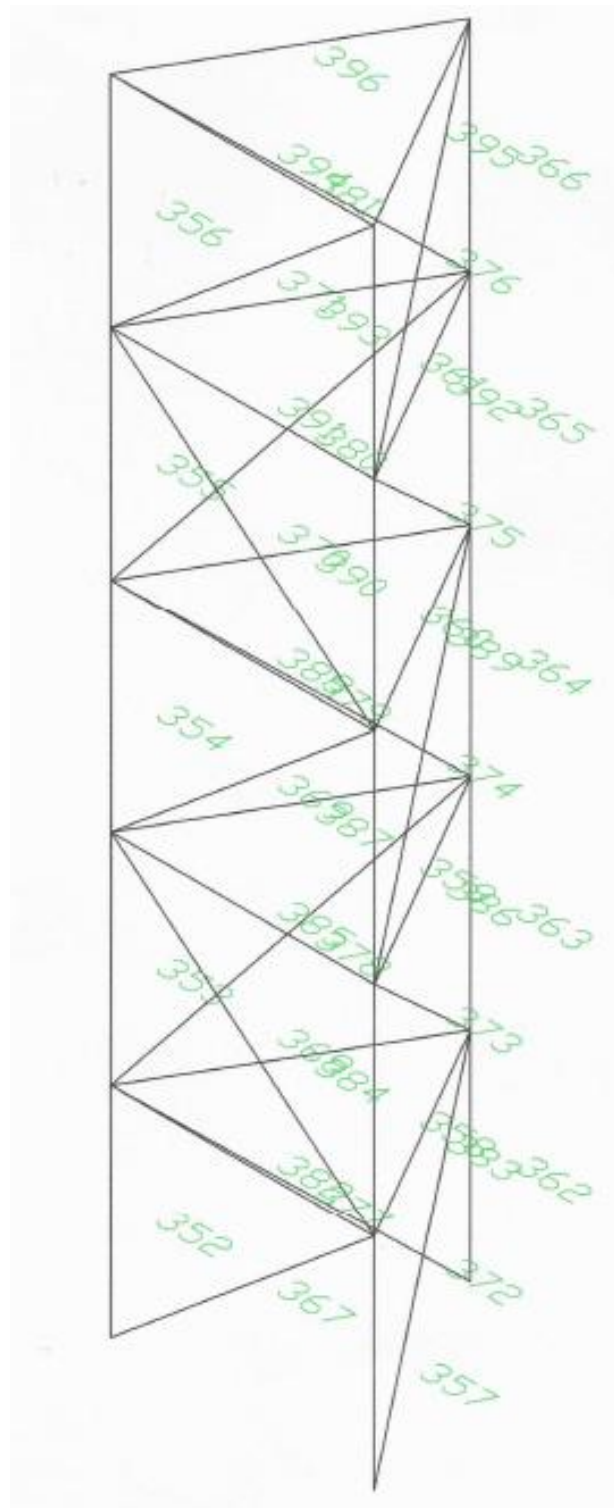
Tramo de empalme:



tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
empalme	289	100	10	1,50	0,15	0,24	15,00	22,50	12,60
empalme	290	100	10	1,00	0,10	0,16	15,00	15,00	8,40
empalme	291	100	10	1,00	0,10	0,16	15,00	15,00	8,40
empalme	292	100	10	1,50	0,15	0,24	15,00	22,50	12,60
empalme	293	100	10	1,50	0,15	0,24	15,00	22,50	12,60
empalme	294	100	10	1,00	0,10	0,16	15,00	15,00	8,40
empalme	295	100	10	1,00	0,10	0,16	15,00	15,00	8,40
empalme	296	100	10	1,50	0,15	0,24	15,00	22,50	12,60
empalme	297	100	10	1,50	0,15	0,24	15,00	22,50	12,60
empalme	298	100	10	1,00	0,10	0,16	15,00	15,00	8,40
empalme	299	100	10	1,00	0,10	0,16	15,00	15,00	8,40
empalme	300	100	10	1,50	0,15	0,24	15,00	22,50	12,60
empalme	301	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	302	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	303	60	6	1,34	0,08	0,16	5,42	7,26	6,75
empalme	304	60	6	1,00	0,06	0,12	5,42	5,42	5,04
empalme	305	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	306	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	307	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	308	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	309	60	6	1,34	0,08	0,16	5,42	7,26	6,75
empalme	310	60	6	1,00	0,06	0,12	5,42	5,42	5,04
empalme	311	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	312	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	313	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	314	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	315	60	6	1,34	0,08	0,16	5,42	7,26	6,75
empalme	316	60	6	1,00	0,06	0,12	5,42	5,42	5,04
empalme	317	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	318	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	319	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	320	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	321	60	6	1,34	0,08	0,16	5,42	7,26	6,75
empalme	322	60	6	1,00	0,06	0,12	5,42	5,42	5,04
empalme	323	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	324	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	325	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	326	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	327	60	6	1,34	0,08	0,16	5,42	7,26	6,75
empalme	328	60	6	1,00	0,06	0,12	5,42	5,42	5,04

empalme	329	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	330	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	331	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	332	60	6	1,06	0,06	0,13	5,42	5,75	5,34
empalme	333	60	6	1,34	0,08	0,16	5,42	7,26	6,75
empalme	334	60	6	1,00	0,06	0,12	5,42	5,42	5,04
empalme	335	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	336	60	6	0,96	0,06	0,12	5,42	5,20	4,84
empalme	337	60	6	1,50	0,09	0,18	5,42	8,13	7,56
empalme	338	60	6	1,50	0,09	0,18	5,42	8,13	7,56
empalme	339	60	6	1,50	0,09	0,18	5,42	8,13	7,56
empalme	340	60	6	0,67	0,04	0,08	5,42	3,63	3,38
empalme	341	60	6	0,67	0,04	0,08	5,42	3,63	3,38
empalme	342	60	6	0,67	0,04	0,08	5,42	3,63	3,38
empalme	343	60	6	0,67	0,04	0,08	5,42	3,63	3,38
empalme	344	60	6	0,67	0,04	0,08	5,42	3,63	3,38
empalme	345	60	6	0,67	0,04	0,08	5,42	3,63	3,38
empalme	346	60	6	1,20	0,07	0,14	5,42	6,50	6,05
empalme	347	60	6	1,20	0,07	0,14	5,42	6,50	6,05
empalme	348	60	6	1,20	0,07	0,14	5,42	6,50	6,05
empalme	349	60	6	1,20	0,07	0,14	5,42	6,50	6,05
empalme	350	60	6	1,20	0,07	0,14	5,42	6,50	6,05
empalme	351	60	6	1,20	0,07	0,14	5,42	6,50	6,05
								517,68	66,36

Tramo final:



tramo	barra	perfil	espesor	longitud	seccion	sec.hielo	Kg/m	peso propio	hielo
final	352	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	353	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	354	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	355	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	356	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	357	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	358	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	359	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	360	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	361	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	362	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	363	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	364	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	365	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	366	90	8	1,00	0,09	0,15	10,90	10,90	7,56
final	367	50	5	1,00	0,05	0,11	3,77	3,77	4,20
final	368	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	369	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	370	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	371	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	372	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	373	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	374	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	375	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	376	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	377	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	378	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	379	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	380	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	381	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	382	50	5	1,56	0,08	0,17	3,77	5,88	6,55
final	383	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	384	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	385	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	386	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	387	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	388	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	389	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	390	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	391	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04

final	392	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	393	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	394	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	395	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
final	396	50	5	1,20	0,06	0,13	3,77	4,52	5,04
								318,82	47,74

7.6 Hojas de resultados ALCE

A modo de ejemplo se incluye aquí una salida de datos del programa ALCE.

En total se trata de 629 páginas de datos.

Por el gran volumen de información, no se adjunta por completo dicho archivo.

Se adjuntan los datos arrojados en referencia a la hipótesis de cálculo número 13 correspondiente al caso 1, es decir, viento frontal. Se incluyen los datos referentes a los 3 tramos inferiores, es decir A1(barras 1-63), A2(barras 64-120) y A3(barras 121-189)

También se incluyen. Por su interés y para comprobar que efectivamente, a pesar de tratarlo como pórtico espacial se comporta como celosía, los diagramas de esfuerzos.

7.6.1 Datos de Salida.

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X                                                                    X
X                                                                    X
X                                                                    X
X      IIIIIIII  II          IIIIIIII  IIIIIIII  X
X      II    II  II          II          II          X
X      II    II  II          II          II          X
X      IIIIIIII  II          II          IIIIIIII  X
X      II    II  II          II          II          X
X      II    II  II          II          II          X
X      II    II  IIIIIIII  IIIIIIII  IIIIIIII  X
X                                                                    X
X                                                                    X
X                                                                    X
X      C A L C U L O   D E   E S T R U C T U R A S      X
X                                                                    X
X                                                                    X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

C L I E N T E : Alfonso Carrasco

P R O Y E C T O : Proyecto Fin de Carrera

N O M B R E D E L A

E S T R U C T U R A : ACME40EX

H I P O T E S I S D E C A R G A N U M E R O = 13

DESCRIPCION = COMB1

REACCIONES EN LOS APOYOS

NUDO	FUERZA X	FUERZA Y	FUERZA Z	MOMENTO X	MOMENTO Y	MOMENTO Z
1	-3.026	-1.242	-41.130	-.014	.072	-.003
7	3.026	-1.242	-41.156	-.014	-.072	.003
13	.000	-7.721	95.509	-.200	.000	.000

PROYECTO:Proyecto Fin de Carrera

21-5-2009

ALCE

PAGINA 282

3 > E S F U E R Z O S E N L A S B A R R A S (E J E S L O C A L E S)

ESFUERZOS EN LAS BARRAS

BARRA	NUDO	FUERZA X AXIAL	FUERZA Y CORTANTE	FUERZA Z CORTANTE	MOMENTO X TORSOR	MOMENTO Y FLECTOR	MOMENTO Z FLECTOR
1	1	-40.292	-.014	-.271	.000	.068	-.024
1	2	40.359	.014	.275	.000	.206	.010
2	2	-40.422	.349	.318	-.001	-.202	-.012
2	3	40.489	-.349	-.315	.001	-.115	.362
3	3	-39.848	-.458	-.371	.001	.131	-.369
3	4	39.915	.458	.375	-.001	.243	-.089
4	4	-39.981	.291	.354	.000	-.240	.084
4	5	40.047	-.291	-.351	.000	-.113	.208
5	5	-38.733	-.272	-.349	.001	.119	-.210
5	6	38.799	.272	.353	-.001	.233	-.063
6	7	-40.318	-.124	-.242	.000	.071	-.013
6	8	40.385	.126	.245	.000	.173	-.112
7	8	-40.448	-.142	.451	.001	-.169	.112
7	9	40.515	.144	-.447	-.001	-.281	-.256
8	9	-39.873	.210	-.551	-.001	.299	.254
8	10	39.940	-.208	.554	.001	.255	-.044
9	10	-40.006	-.081	.452	.000	-.250	.044
9	11	40.072	.083	-.448	.000	-.200	-.126
10	11	-38.760	.060	-.439	-.001	.209	.122
10	12	38.827	-.059	.442	.001	.233	-.063
11	13	93.275	.569	.328	.000	-.085	.148
11	14	-93.209	-.566	-.326	.000	-.243	.420
12	14	93.263	-.755	-.436	.000	.248	-.429
12	15	-93.196	.758	.438	.000	.189	-.328
13	15	91.635	.817	.472	.000	-.187	.324
13	16	-91.568	-.814	-.470	.000	-.285	.493
14	16	91.636	-.753	-.435	.000	.289	-.500
14	17	-91.569	.757	.437	.000	.148	-.256
15	17	88.222	.710	.410	.000	-.140	.242

15	18	-88.155	-.706	-.408	.000	-.270	.467
16	1	-1.369	.000	.010	.000	.000	-.002
16	19	1.389	.000	.021	.000	.010	.003
17	19	-1.333	-.004	-.026	.000	.030	-.004
17	9	1.353	.004	.054	.000	.039	-.002
18	9	-.142	-.002	-.019	.000	.024	-.001
18	20	.162	.002	.047	.000	.033	-.002
19	20	-.232	.002	-.009	.000	.014	.003
19	5	.252	-.002	.035	.000	.022	.001
20	5	-1.063	.002	-.011	.000	.016	.000
20	21	1.083	-.002	.037	.000	.023	.003
21	7	-1.369	.000	.010	.000	.000	.002
21	19	1.389	.000	.021	.000	.010	-.003
22	19	-1.333	.004	-.026	.000	.030	.004
22	3	1.353	-.004	.054	.000	.039	.002
23	3	-.142	.002	-.019	.000	.024	.001
23	20	.162	-.002	.047	.000	.033	.002
24	20	-.232	-.002	-.009	.000	.014	-.003
24	11	.252	.002	.035	.000	.022	-.001

PROYECTO: Proyecto Fin de Carrera

21-5-2009

ALCE

PAGINA 283

25	11	-1.063	-.002	-.011	.000	.016	.000
25	21	1.084	.002	.037	.000	.023	-.003
26	7	-.250	-.004	.001	.000	.002	-.001
26	22	.271	.004	.029	.000	.023	-.006
27	22	.086	.012	.062	.000	-.051	.012
27	15	-.065	-.012	-.033	.000	-.031	.009
28	15	1.286	.007	.058	.000	-.035	.005
28	23	-1.266	-.007	-.029	.000	-.040	.008
29	23	.786	.000	.003	.000	.012	-.001
29	11	-.766	.000	.023	.000	.004	.001
30	11	-.572	.000	.002	.000	.000	.001
30	24	.593	.000	.025	.000	.019	-.001
31	13	2.066	-.002	.036	.000	-.018	-.003
31	22	-2.046	.002	-.006	.000	-.021	-.001
32	22	1.396	.005	.021	.000	-.003	.006
32	9	-1.375	-.005	.008	.000	-.008	.003
33	9	-.951	.004	.015	.000	-.011	.003
33	23	.972	-.004	.013	.000	.009	.004
34	23	-.590	.005	.049	.000	-.040	.004
34	17	.610	-.005	-.023	.000	-.019	.003
35	17	2.013	.003	.052	.000	-.029	.001
35	24	-1.993	-.003	-.026	.000	-.035	.004
36	13	2.066	.002	.036	.000	-.018	.003
36	25	-2.045	-.002	-.006	.000	-.021	.001
37	25	1.395	-.005	.021	.000	-.003	-.006
37	3	-1.375	.005	.008	.000	-.008	-.003
38	3	-.950	-.004	.015	.000	-.011	-.003
38	26	.971	.004	.013	.000	.009	-.004
39	26	-.589	-.005	.049	.000	-.040	-.004
39	17	.609	.005	-.023	.000	-.019	-.003

40	17	2.012	-.003	.052	.000	-.029	-.001
40	27	-1.991	.003	-.026	.000	-.035	-.004
41	1	-.251	.004	.001	.000	.002	.001
41	25	.271	-.004	.029	.000	.023	.006
42	25	.085	-.012	.062	.000	-.051	-.012
42	15	-.064	.012	-.033	.000	-.031	-.009
43	15	1.287	-.007	.058	.000	-.035	-.005
43	26	-1.267	.007	-.029	.000	-.040	-.008
44	26	.788	.000	.003	.000	.012	.001
44	5	-.768	.000	.023	.000	.004	-.001
45	5	-.574	.000	.002	.000	.000	-.001
45	27	.595	.000	.025	.000	.019	.001
46	2	.708	-.004	.021	.000	-.005	-.002
46	19	-.708	.004	.008	.000	-.005	-.004
47	19	.708	.004	.008	.000	.005	.004
47	8	-.708	-.004	.021	.000	.005	.002
48	8	-.014	-.003	.007	.000	.000	-.003
48	22	.014	.003	.022	.000	.011	-.002
49	22	-.831	-.007	.016	.000	-.007	-.007
49	14	.831	.007	.014	.000	.006	-.004
50	2	-.014	.003	.007	.000	.000	.003
50	25	.014	-.003	.022	.000	.011	.002
51	25	-.832	.007	.016	.000	-.007	.007
51	14	.832	-.007	.014	.000	.006	.004
52	4	1.200	-.005	.012	.000	-.004	-.001
52	20	-1.200	.005	.016	.000	.007	-.005
53	20	1.200	.005	.016	.000	-.007	.005
53	10	-1.200	-.005	.012	.000	.004	.001

PROYECTO: Proyecto Fin de Carrera

21-5-2009

ALCE

PAGINA 284

54	10	-.375	-.005	.013	.000	-.001	-.004
54	23	.375	.005	.014	.000	.001	-.003
55	23	-1.052	-.011	.009	.000	.002	-.009
55	16	1.052	.011	.019	.000	.005	-.005
56	4	-.375	.005	.013	.000	-.001	.004
56	26	.375	-.005	.014	.000	.001	.003
57	26	-1.052	.011	.009	.000	.002	.009
57	16	1.052	-.011	.019	.000	.005	.005
58	6	.747	-.006	.015	.000	-.003	-.002
58	21	-.747	.006	.010	.000	.000	-.006
59	21	.747	.006	.010	.000	.000	.006
59	12	-.747	-.006	.015	.000	.003	.002
60	12	.370	-.006	.008	.000	.000	-.004
60	24	-.370	.006	.018	.000	.006	-.004
61	24	-1.245	-.012	.011	.000	-.003	-.010
61	18	1.245	.012	.014	.000	.005	-.006
62	6	.369	.006	.008	.000	.000	.004
62	27	-.369	-.006	.018	.000	.007	.004
63	27	-1.246	.012	.011	.000	-.003	.010
63	18	1.246	-.012	.014	.000	.005	.006

64	6	-38.863	.364	.347	-.001	-.229	.061
64	28	38.929	-.364	-.343	.001	-.116	.304
65	28	-38.485	-.394	-.401	.001	.130	-.306
65	29	38.552	.394	.405	-.001	.274	-.089
66	29	-38.623	.408	.420	-.001	-.270	.087
66	30	38.689	-.408	-.416	.001	-.148	.322
67	30	-37.770	-.355	-.441	.001	.157	-.320
67	31	37.837	.355	.445	-.001	.286	-.036
68	31	-37.903	.259	.427	-.001	-.285	.034
68	32	37.970	-.259	-.423	.001	-.141	.225
69	12	-38.890	-.140	.483	.001	-.229	.063
69	33	38.957	.142	-.479	-.001	-.252	-.204
70	33	-38.509	.140	-.545	-.001	.266	.199
70	34	38.576	-.138	.548	.001	.282	-.060
71	34	-38.646	-.144	.568	.001	-.278	.060
71	35	38.713	.146	-.565	-.001	-.289	-.205
72	35	-37.803	.086	-.560	-.001	.296	.199
72	36	37.870	-.085	.563	.001	.266	-.113
73	36	-37.936	-.008	.500	.001	-.264	.113
73	37	38.003	.010	-.497	-.001	-.235	-.122
74	18	88.220	-.781	-.450	.000	.274	-.474
74	38	-88.153	.784	.452	.000	.178	-.310
75	38	86.977	.857	.495	.000	-.178	.310
75	39	-86.910	-.854	-.493	.000	-.316	.547
76	39	86.998	-.881	-.510	.000	.319	-.552
76	40	-86.931	.884	.511	.000	.192	-.332
77	40	84.439	.886	.512	.000	-.188	.325
77	41	-84.373	-.883	-.510	.000	-.323	.561
78	41	84.454	-.898	-.516	.000	.327	-.567
78	42	-84.387	.901	.518	.000	.191	-.334
79	21	-1.065	-.004	-.024	.000	.025	-.004
79	33	1.085	.004	.048	.000	.032	-.002
80	33	-.496	-.002	-.020	.000	.021	.001
80	43	.517	.002	.044	.000	.028	-.003
81	43	-.520	.006	-.031	.000	.029	.005
81	30	.541	-.006	.054	.000	.035	.003
82	30	-1.279	.003	-.033	.000	.030	.000
82	44	1.299	-.003	.056	.000	.036	.005

PROYECTO:Proyecto Fin de Carrera

21-5-2009

ALCE

PAGINA 285

83	44	-1.285	-.007	-.027	.000	.024	-.008
83	37	1.305	.007	.047	.000	.029	-.002
84	21	-1.065	.004	-.024	.000	.025	.004
84	28	1.085	-.004	.048	.000	.032	.002
85	28	-.496	.002	-.020	.000	.021	-.001
85	43	.517	-.002	.044	.000	.028	.003
86	43	-.521	-.006	-.031	.000	.029	-.005
86	35	.542	.006	.054	.000	.035	-.003
87	35	-1.279	-.003	-.033	.000	.030	.000
87	44	1.299	.003	.056	.000	.036	-.005
88	44	-1.286	.007	-.027	.000	.024	.007

88	32	1.306	-.007	.047	.000	.029	.002
89	24	.363	.011	.065	.000	-.051	.010
89	38	-.342	-.011	-.041	.000	-.032	.008
90	38	1.151	.006	.061	.000	-.033	.003
90	45	-1.131	-.006	-.037	.000	-.044	.007
91	45	.471	.005	.004	.000	.011	.004
91	35	-.451	-.005	.018	.000	.000	.003
92	35	-.136	.005	.003	.000	-.006	.004
92	46	.156	-.005	.019	.000	.018	.003
93	46	.544	.013	.074	.000	-.056	.011
93	42	-.524	-.013	-.054	.000	-.034	.008
94	24	.839	.004	.008	.000	.007	.004
94	33	-.819	-.004	.016	.000	-.001	.002
95	33	-.461	.002	.006	.000	-.006	.002
95	45	.482	-.002	.019	.000	.016	.001
96	45	.053	.013	.068	.000	-.053	.011
96	40	-.033	-.013	-.046	.000	-.032	.008
97	40	1.773	.010	.070	.000	-.037	.005
97	46	-1.753	-.010	-.048	.000	-.051	.010
98	46	.909	.003	-.004	.000	.017	.002
98	37	-.889	-.003	.025	.000	.004	.003
99	27	.838	-.004	.008	.000	.007	-.004
99	28	-.817	.004	.016	.000	-.001	-.002
100	28	-.457	-.002	.006	.000	-.006	-.002
100	47	.478	.002	.018	.000	.016	-.001
101	47	.057	-.013	.068	.000	-.053	-.011
101	40	-.037	.013	-.046	.000	-.032	-.008
102	40	1.766	-.011	.070	.000	-.037	-.005
102	48	-1.745	.011	-.048	.000	-.051	-.010
103	48	.901	-.003	-.004	.000	.017	-.001
103	32	-.881	.003	.024	.000	.004	-.003
104	27	.361	-.011	.065	.000	-.051	-.010
104	38	-.340	.011	-.041	.000	-.032	-.008
105	38	1.156	-.006	.062	.000	-.033	-.003
105	47	-1.136	.006	-.037	.000	-.044	-.007
106	47	.476	-.005	.004	.000	.011	-.004
106	30	-.456	.005	.019	.000	.000	-.003
107	30	-.143	-.005	.003	.000	-.006	-.004
107	48	.163	.005	.019	.000	.018	-.003
108	48	.537	-.013	.074	.000	-.056	-.011
108	42	-.516	.013	-.054	.000	-.035	-.008
109	29	1.284	-.008	.014	.000	-.003	-.002
109	43	-1.284	.008	.009	.000	.000	-.008
110	43	1.284	.008	.009	.000	.000	.008
110	34	-1.284	-.008	.014	.000	.003	.002
111	34	-.318	-.008	.009	.000	.000	-.005
111	45	.318	.008	.015	.000	.004	-.005

PROYECTO: Proyecto Fin de Carrera

21-5-2009

ALCE

PAGINA 286

112	45	-1.169	-.018	.009	.000	.000	-.013
112	39	1.169	.018	.014	.000	.003	-.007

113	29	-.317	.008	.009	.000	.000	.005
113	47	.317	-.008	.015	.000	.004	.005
114	47	-1.167	.018	.009	.000	.000	.013
114	39	1.167	-.018	.014	.000	.003	.007
115	31	1.122	-.012	.008	.000	-.003	-.003
115	44	-1.122	.012	.013	.000	.005	-.009
116	44	1.121	.012	.013	.000	-.005	.009
116	36	-1.121	-.012	.008	.000	.003	.003
117	36	-.096	-.009	.007	.000	.000	-.005
117	46	.096	.009	.014	.000	.003	-.004
118	46	-1.150	-.022	.005	.000	.002	-.015
118	41	1.150	.022	.016	.000	.004	-.009
119	31	-.099	.009	.007	.000	.000	.005
119	48	.099	-.009	.014	.000	.003	.004
120	48	-1.153	.022	.005	.000	.002	.015
120	41	1.153	-.022	.016	.000	.004	.009
121	32	-37.667	-.336	-.483	.001	.153	-.230
121	49	37.726	.336	.486	-.001	.332	-.107
122	49	-37.808	.597	.536	-.002	-.330	.101
122	50	37.867	-.597	-.533	.002	-.206	.497
123	50	-37.157	-.494	-.527	.002	.203	-.492
123	51	37.217	.494	.530	-.002	.327	-.002
124	51	-37.287	.161	.377	.000	-.319	.004
124	52	37.347	-.161	-.374	.000	-.057	.157
125	52	-37.830	-.014	-.256	.000	.032	-.157
125	53	37.889	.014	.259	.000	.226	.143
126	37	-37.683	.049	-.586	-.001	.248	.121
126	54	37.742	-.047	.589	.001	.341	-.073
127	54	-37.823	-.262	.760	.002	-.337	.072
127	55	37.883	.264	-.757	-.002	-.422	-.336
128	55	-37.205	.158	-.704	-.002	.423	.326
128	56	37.265	-.156	.707	.002	.284	-.169
129	56	-37.336	.094	.402	.000	-.279	.164
129	57	37.396	-.093	-.399	.000	-.122	-.071
130	57	-37.557	-.206	-.156	.000	.095	.082
130	58	37.617	.208	.159	.000	.063	-.289
131	42	83.585	.989	.570	.000	-.194	.338
131	59	-83.525	-.986	-.569	.000	-.377	.651
132	59	83.659	-1.080	-.627	.000	.377	-.651
132	60	-83.599	1.083	.628	.000	.252	-.432
133	60	81.297	1.042	.597	.000	-.246	.423
133	61	-81.237	-1.039	-.595	.000	-.351	.620
134	61	81.340	-.774	-.397	.000	.346	-.613
134	62	-81.281	.777	.399	.000	.053	-.164
135	62	81.805	.504	.142	.000	-.003	.088
135	63	-81.746	-.501	-.140	.000	-.138	.415
136	32	-.675	.004	-.020	.000	.018	.000
136	64	.693	-.004	.038	.000	.023	.007
137	64	-.629	-.013	-.069	.000	.050	-.009
137	55	.647	.013	.086	.000	.054	-.008
138	55	-2.238	-.009	-.076	.000	.055	-.002
138	65	2.256	.009	.093	.000	.059	-.010
139	65	-2.279	.005	-.012	.000	.011	.012
139	52	2.298	-.005	.027	.000	.014	-.005

140	52	-2.215	.002	-.065	.000	.034	.001
140	66	2.224	-.002	.079	.000	.035	.001
PROYECTO:Proyecto Fin de Carrera					21-5-2009		
ALCE					PAGINA 287		
141	66	-2.293	.009	-.047	.000	.021	-.003
141	58	2.302	-.009	.061	.000	.027	.010
142	37	-.675	-.004	-.020	.000	.018	.000
142	64	.693	.004	.038	.000	.023	-.007
143	64	-.626	.013	-.069	.000	.050	.009
143	50	.644	-.013	.085	.000	.054	.008
144	50	-2.241	.009	-.076	.000	.055	.002
144	65	2.260	-.009	.093	.000	.059	.011
145	65	-2.227	-.008	-.011	.000	.011	-.013
145	57	2.245	.008	.026	.000	.013	.003
146	57	-2.068	-.005	-.070	.000	.036	.000
146	66	2.077	.005	.085	.000	.038	-.005
147	66	-2.135	.000	-.034	.000	.019	.006
147	53	2.144	.000	.048	.000	.018	-.007
148	37	-.158	-.001	-.012	.000	.002	.001
148	67	.176	.001	.031	.000	.028	-.003
149	67	.564	.030	.099	.000	-.073	.024
149	60	-.546	-.030	-.082	.000	-.049	.017
150	60	1.986	.029	.106	.000	-.055	.015
150	68	-1.968	-.029	-.090	.000	-.076	.024
151	68	.937	-.006	-.024	.000	.034	-.008
151	57	-.918	.006	.039	.000	.007	.000
152	57	.571	.005	-.024	.000	.008	.003
152	69	-.562	-.005	.038	.000	.021	.002
153	69	.620	-.009	.104	.000	-.057	-.001
153	63	-.611	.009	-.090	.000	-.029	-.008
154	42	.978	.005	.069	.000	-.033	.002
154	67	-.960	-.005	-.051	.000	-.051	.005
155	67	.063	.014	.009	.000	.008	.012
155	55	-.045	-.014	.008	.000	-.009	.006
156	55	.782	.018	.010	.000	-.015	.011
156	68	-.764	-.018	.006	.000	.013	.013
157	68	1.718	.004	.058	.000	-.050	.006
157	62	-1.700	-.004	-.043	.000	-.015	-.001
158	62	1.332	.008	.118	.000	-.050	.002
158	69	-1.322	-.008	-.103	.000	-.055	.006
159	69	1.217	-.007	-.009	.000	.019	-.007
159	58	-1.208	.007	.023	.000	-.005	.001
160	42	.994	-.005	.069	.000	-.033	-.002
160	70	-.976	.005	-.051	.000	-.052	-.005
161	70	.081	-.014	.008	.000	.008	-.012
161	50	-.063	.014	.008	.000	-.008	-.006
162	50	.763	-.018	.009	.000	-.015	-.011
162	71	-.745	.018	.007	.000	.013	-.013
163	71	1.728	-.001	.063	.000	-.052	-.006
163	62	-1.710	.001	-.049	.000	-.020	.004
164	62	2.087	-.006	.121	.000	-.051	-.003

164	72	-2.078	.006	-.107	.000	-.058	-.003
165	72	2.028	.001	-.026	.000	.029	.004
165	53	-2.019	-.001	.040	.000	.000	-.003
166	32	-.144	.001	-.012	.000	.002	-.001
166	70	.162	-.001	.030	.000	.028	.003
167	70	.577	-.030	.098	.000	-.072	-.024
167	60	-.559	.030	-.082	.000	-.049	-.017
168	60	1.973	-.029	.105	.000	-.055	-.015
168	71	-1.955	.029	-.089	.000	-.076	-.025
169	71	.890	.006	-.020	.000	.032	.009
169	52	-.872	-.006	.035	.000	.004	.000

PROYECTO:Proyecto Fin de Carrera

21-5-2009

ALCE

PAGINA 288

170	52	1.142	-.004	-.013	.000	.004	-.003
170	72	-1.133	.004	.028	.000	.015	-.001
171	72	1.235	.005	.071	.000	-.044	.000
171	63	-1.226	-.005	-.057	.000	-.013	.005
172	49	1.556	-.015	.022	.000	-.003	-.003
172	64	-1.556	.015	-.004	.000	-.010	-.011
173	64	1.557	.015	-.004	.000	.010	.011
173	54	-1.557	-.015	.022	.000	.003	.003
174	54	-.388	-.013	.001	.000	-.001	-.006
174	67	.388	.013	.016	.000	.008	-.006
175	67	-1.401	-.032	.015	.000	-.006	-.019
175	59	1.401	.032	.002	.000	.000	-.011
176	49	-.385	.013	.002	.000	-.001	.006
176	70	.385	-.013	.016	.000	.008	.006
177	70	-1.396	.032	.015	.000	-.006	.019
177	59	1.396	-.032	.002	.000	.000	.011
178	51	1.183	-.020	-.012	.000	-.002	-.004
178	65	-1.183	.020	.027	.000	.018	-.013
179	65	1.149	.020	.027	.000	-.018	.013
179	56	-1.149	-.020	-.011	.000	.002	.004
180	56	-.053	-.013	.029	.000	-.006	-.006
180	68	.053	.013	-.013	.000	-.012	-.005
181	68	-1.214	-.036	.006	.000	.007	-.019
181	61	1.214	.036	.009	.000	-.005	-.012
182	51	-.111	.014	.030	.000	-.007	.007
182	71	.111	-.014	-.014	.000	-.012	.005
183	71	-1.310	.035	.005	.000	.007	.018
183	61	1.310	-.035	.011	.000	-.004	.012
184	52	2.736	.000	.015	.000	-.004	.004
184	57	-2.736	.000	.014	.000	.002	-.004
185	57	-1.478	.001	-.002	.000	.009	-.001
185	62	1.478	-.001	.031	.000	.018	.003
186	52	-1.741	-.002	-.001	.000	.009	.001
186	62	1.741	.002	.030	.000	.016	-.004
187	53	.671	.002	.007	.000	.001	.004
187	58	-.671	-.002	.020	.000	.008	.000
188	58	-1.510	-.002	.003	.000	.005	-.004
188	63	1.510	.002	.024	.000	.012	.000

189	53	.738	.000	-.005	.000	.010	.000
189	63	-.738	.000	.032	.000	.017	.000

7.6.2 Diagramas de esfuerzos.

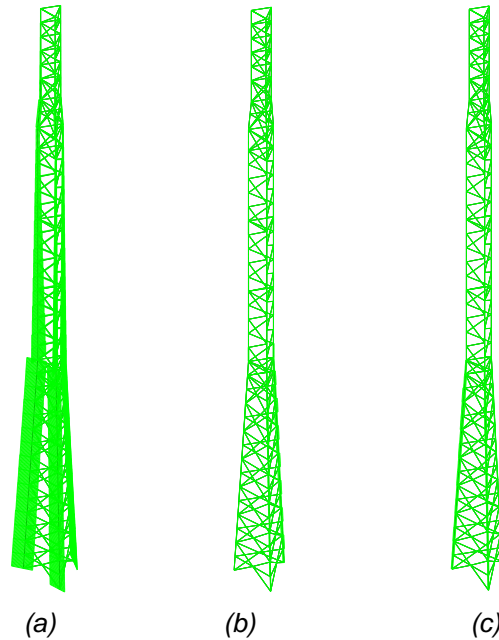


Figura 18. (a) Esfuerzos axiales. (b) Esfuerzos cortantes en y. (c) Cortantes en z

En la imagen superior se presentan los diagramas de axiles y cortantes.

Por orden, y de izquierda a derecha se trata de axiles (a), cortantes en eje y (b), y cortantes en eje z (c).

Los primeros en la escala más pequeña que permite el programa ALCE, y los dos últimos en la escala mayor.

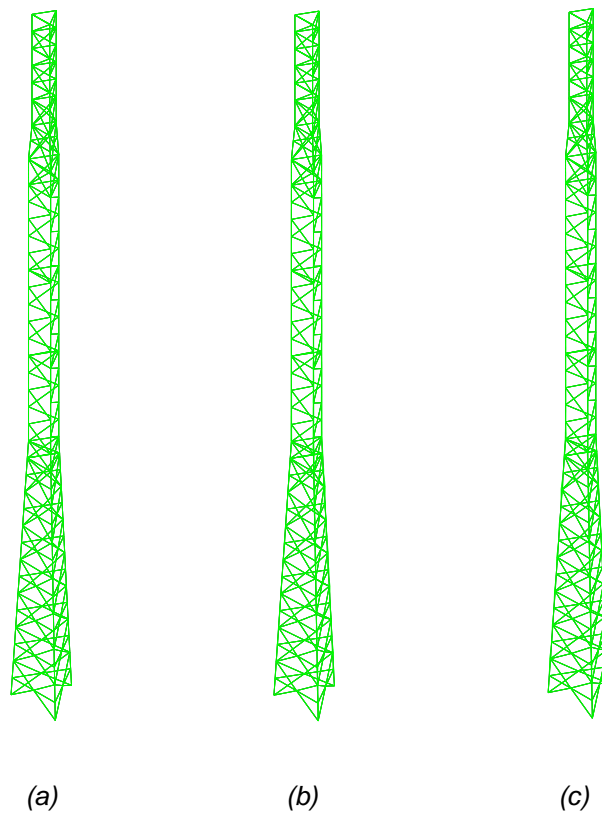


Figura 19. (a) Momento torsor según x. (b) Momento flector según y. (c) Momento flector en z

Aquí se muestran los diagramas de momentos torsor y flectores, por orden y de izquierda a derecha son momento torsor en x (a), flector en y (b), y flector en z (c).

Los tres representados en la escala mayor, se aprecian poco importantes.

Se puede afirmar, por tanto, como se decía en anteriores capítulos que, la estructura, a pesar de ser tratada como pórtico espacial, se comporta prácticamente como una celosía.

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS

8.1 Referencias:

- ER.0008: Estructuras Soporte de antenas en celosía tipo M4A – CEL/CUA – EX. Telefónica Móviles España. Septiembre 2001.
- ER.0009: Estructuras Soporte de antenas en celosía tipo M4A – CEL/CUA – ME. Telefónica Móviles España. Septiembre 2001.
- Fichas técnicas de la Asociación Técnica Española de Galvanización. Edición 2004.
- NBE – EA – 95. Norma Básica de la Edificación. Estructuras de acero en edificación. Ministerio de Fomento. Edición 2002.
- Apuntes de Ingeniería Estructural. 4º Curso de Ingeniería Industrial. Enrique Barbero Pozuelo, Ángel Arias Hernández, Sonia Sánchez Sáez, Manuel Cuadrado Sanguino. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. UC3M. Edición 2004.
- Apuntes de Estructuras Industriales. 5º Curso de Ingeniería Industrial. Sonia Sánchez Sáez, Manuel Cuadrado Sanguino. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. UC3M. Edición 2005/06.
- Catálogo General FATOR 2003/04. Tornillería Industrial.
- Norma DIN – 4131. Torres de acero portadoras de antenas. AENOR bajo licencia. Noviembre 1991.